

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Analýza využití vláknově optického senzoru v tramvajové  
dopravě.**

**Analysis Of the Uses the Fiber-Optic Sensor in the Tram Traffic**

**2020**

**Tomáš Matoušek**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Matoušek**  
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie  
Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika  
Téma: **Analýza využití vláknově optického senzoru v tramvajové dopravě**  
**Analysis Of the Uses the Fiber-Optic Sensor in the Tram Traffic**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Pro fotonické technologie je charakteristická maximální odolnost proti elektrickému a elektromagnetickému rušení, kdy zejména konvenční elektrické a elektromagnetické systémy mají s nástupem nových trakčních technologií do hnacích kolejových vozidel problémy s funkční spolehlivostí. Důvodem je značné zvýšení elektromagnetického rušení v těsné blízkosti moderních hnacích vozidel a rušení, které se nese kolejnicemi superponované na zpětných trakčních proudcích. Navrhovaný senzor založený na optických vláknech by měl výše uvedené problémy eliminovat.

1. Zpracujte rešerši o vláknově optických interferometrech v dopravních aplikacích.
2. Sestavte prototyp vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru.
3. Proveďte měření šumového pozadí interferometru a schopnosti detekce průjezdu tramvajových vozidel v reálném provozu.
4. Porovnejte naměřená data vzhledem k šumovému pozadí interferometru, vyhodnoťte úspěšnost detekce průjezdu tramvajových vozidel.

### Seznam doporučené odborné literatury:

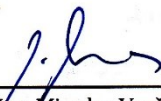
- [1] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. *Handbook of optical fibre sensing technology*. New York: Wiley, 2002, 795 p. ISBN 0471820539.
- [2] GOODWIN, Eric P a James C WYANT. *Field guide to interferometric optical testing*. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006, xii, 100 p. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Nedoma, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Novém Jičíně dne: 21. dubna 2020

  
.....  
Podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Janu Nedomovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Cílem práce je provést rešerši o vláknově optických interferometrech v dopravních aplikacích a prakticky realizovat a otestovat interferometrický senzor v tramvajovém kolejovém provozu. Úvodní část práce popisuje základní principy funkcionality optických vláken a interferometrických typů senzorů. Porovnány jsou různé typy interferometrů a optických senzorů, které byly využity pro potřeby monitorování různých parametrů v kolejové dopravě. Na základě dříve nabitých vědomostí a nových zkušeností byl sestaven funkční vzorek Mach-Zehnderova senzoru vhodného i pro uložení do země pro detekci tramvajových vozidel. Tento senzor využívá výhod optických vláken jako je imunita vůči elektromagnetickému rušení, pasivita z hlediska napájení elektrickou energií či možnost vzdáleného vyhodnocení užitečné informace.

## **Klíčová slova**

Světlo, optická vlákna, interferometr, interferometrie, Mach-Zehnderův interferometr, disperze, koherence, interference, numerická apertura, index lomu, zákon lomu, zákon odrazu, interferometrie

## **Abstract**

The aim of this work is to search for fiber optic interferometers in traffic applications and to practically implement and test an interferometric sensor in tramway traffic. The introductory part describes the basic principles of the functionality of optical fibers and interferometric types of sensors. Different types of interferometers and optical sensors were compared, which were used for monitoring various parameters in rail transport. Based on previously acquired knowledge and new experience, a functional sample of the Mach-Zehnder sensor, suitable also for ground-based detection of tram vehicles, was assembled. This sensor takes advantage of optical fibers such as immunity to electromagnetic interference, passivity in terms of power supply and the possibility of remotely evaluating useful information.

## **Keywords**

Light, an optical fiber interferometer, interferometry, Mach-Zehnder interferometer, a dispersion, coherence, interference, numerical aperture, refractive index, refraction law, the law of reflection, interferometry

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 10 -
Seznam použitých zkratek.....	- 11 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 12 -
Úvod.....	- 14 -
1 Teoretická část.....	- 15 -
1.1 Optovláknové senzory.....	- 15 -
1.2 Světlo .....	- 15 -
1.3 Zákon odrazu.....	- 16 -
1.4 Zákon lomu (Snellův zákon).....	- 17 -
1.5 Disperze světla .....	- 18 -
1.6 Optická vlákna .....	- 18 -
1.6.1 Šířka pásma optického vlákna .....	- 20 -
1.6.2 Numerická apertura .....	- 20 -
1.6.3 Disperze.....	- 22 -
1.6.4 Vidová disperze.....	- 22 -
1.6.5 Chromatická disperze .....	- 22 -
1.6.6 Polarizační vidová disperze.....	- 23 -
1.6.7 Útlum světelného paprsku v optickém vláknu .....	- 23 -
1.6.8 Útlum vzniklý absorpcí .....	- 24 -
1.6.9 Rayleighův rozptyl .....	- 24 -
1.6.10 Ohyb vlákna .....	- 24 -
1.6.11 Ztráty na makroskopických neregularitách .....	- 25 -
1.7 Spojování optických vláken .....	- 26 -
1.7.1 Konektory.....	- 26 -
1.7.2 Svařované spoje.....	- 26 -
1.7.3 Ochrana optických vláken .....	- 27 -
1.8 Interference .....	- 27 -
1.8.1 Koherence záření.....	- 28 -
1.8.2 Časová koherence.....	- 28 -
1.8.3 Prostorová koherence .....	- 28 -
1.9 Interferometrie .....	- 29 -



1.9.1	Interferometry.....	- 29 -
1.9.2	Sagnacův interferometr .....	- 29 -
1.9.3	Michelsonův interferometr .....	- 30 -
1.9.4	Mach-Zehnderův interferometr .....	- 31 -
1.9.5	Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr.....	- 31 -
1.10	Optické senzory v dopravě.....	- 32 -
1.10.1	Vláknově optické a optické senzory.....	- 32 -
1.10.2	Optické senzory a aktivní infračervené senzory.....	- 32 -
1.10.3	Technologie DAS (Distributed Acoustic Sensor) .....	- 32 -
1.10.4	Technologie POTDR (Polarization Optical Time Domain Reflectometry)-	33 -
1.10.5	Technologie LIDAR (Light Detection And Ranging).....	- 33 -
1.10.6	Distribuované senzory .....	- 33 -
1.10.7	Výkonové (intenzitní) senzory .....	- 34 -
1.10.8	Senzory detekce mikroohybů v optickém vlákne.....	- 34 -
1.10.9	Technologie FBG (Fiber Bragg Grating) .....	- 34 -
1.10.10	Interferometrické senzory.....	- 34 -
2	Praktická část .....	- 36 -
2.1	Vlastní konstrukce senzoru s M-Z interferometrem .....	- 36 -
2.1.1	Použité přístroje pro měření .....	- 37 -
2.1.2	Popis konstrukce senzoru .....	- 38 -
2.2	Zpracování signálu.....	- 42 -
2.2.1	Provedené praktické měření tramvají.....	- 44 -
3	Závěr .....	- 47 -
4	Použitá Literatura:.....	- 48 -
5	Seznam příloh.....	I

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>A</b>	dB/km	Měrný útlum
<b>I</b>	A	Proud
<b>L</b>	m	Délka zázněje
<b>NA</b>	-	Numerická apertura
<b>P</b>	W	Výkon
<b>U</b>	V	Napětí
<b>c</b>	m/s	Rychlost světla
<b>f</b>	Hz	Frekvence
<b>n</b>	-	Index lomu
<b>r</b>	m	Poloměr
<b>s</b>	m	Dráha
<b>t</b>	s	Čas
<b>v</b>	m/s	Rychlost
<b><math>\alpha</math></b>	°	úhel
<b><math>\beta</math></b>	°	úhel
<b><math>\lambda</math></b>	m	Vlnová délka
<b><math>\phi</math></b>	°	úhel
<b>a</b>	m	vzdálenost zdroje od stínítka
<b><math>A_C</math></b>	m	průřez jádra optického vlákna
<b><math>A_S</math></b>	m	plocha světelného paprsku vyzářeného zdrojem na konec optického vlákna
<b><math>\alpha_A</math></b>	dB	útlum způsobený absorbcí
<b><math>\alpha_R</math></b>	-	Rayleighův rozptyl
<b><math>\alpha_N</math></b>	-	rozptyl vzniklý z důvodu makroskopických neregularit
<b><math>\alpha_{MO}</math></b>	-	rozptyl vzniklý na mikroohybech
<b><math>\alpha_O</math></b>	-	rozptyl vzniklý na makroohybech

---

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>CRT</b>	Cathoderay tube
<b>DFB</b>	Distributed Feedback
<b>MFD</b>	Mode Field Diameter
<b>OH</b>	Ionty vody
<b>OLED</b>	Organic light emitting diod
<b>PbSe</b>	Olovo a selen
<b>RGB</b>	Red, green, blue
<b>FC</b>	Flat Contact
<b>PC</b>	Physical Contact
<b>UPC</b>	Ultra Physical Contact
<b>APC</b>	Angled Physical Contact
<b>HDPE</b>	High Density Poly Etylen
<b>PVC</b>	Poly Vinyl chlorid
<b>OTDR</b>	Optical Time Domain Reflectometry
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>LIDAR</b>	Light Detection And Ranging
<b>POTDR</b>	Polarization Optical Time Domain Reflectometry
<b>DAS</b>	Distributed Acoustic Sensor
<b>FBG</b>	Fiber Bragg Grating
<b>ARCAP</b>	Slitina odolná vůči korozi

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Odraz světla	16
1.2	Lom světla	17
1.3	Rozklad světla na hranolu	18
1.4	Jednovidové optické vlákno	19
1.5	Vícevidové optické vlákno	20
1.6	Gradientní optické vlákno	20
1.7	Navázání paprsku do pláště	21
1.8	Útlum paprsku ve vlákne v závislosti na vlnové délce	24
1.9	Sagnacův interferometr	29
1.10	Michelsonův interferometr	30
1.11	Mach-Zehnderův interferometr	31
1.12	Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr	32
2.1	Kompletní schéma využití při měření vláknově optického M-Z interferometru	37
2.2	Nerezové šasi s již přilepenou senzorickou částí Mach-Zehnderova interferometru	38
2.3	Příprava vložení izolační vrstvy pro referenční vlákno	38
2.4	Uložení děličů a referenční větve na izolační vrstvě a vyvedení optických vláken otvory v šasi	39
2.5	Po vložení druhé izolační vrstvy	39
2.6	Zcela složený interferometrický senzor bez dodatečných ochrann	40
2.7	Senzorická jednotka již s dodatečnými ochranami pro venkovní měření	40
2.8	Příprava výkopu pro měření	41
2.9	Umístěný senzor v již připraveném výkopu	41

---

<b>2.10</b>	Senzor po zahrnutí zeminou	42
<b>2.11</b>	Senzor s projíždějící tramvají	42
<b>2.12</b>	Ukázka záznamu a vyhodnocení detekce průjezdu tramvajového vozidla	43
<b>2.13</b>	Část struktury aplikace	43
<b>2.14</b>	Zjednodušené schéma realizace praktických měření detekce tramvajových vozidel	44
<b>2.15</b>	Příklad průjezdu tramvaje číslo 1 (typ Inekon LTM 10.08)	45
<b>2.16</b>	Příklad průjezdu tramvaje číslo 2 (typ Inekon 2001 TRIO)	45
<b>2.17</b>	Příklad průjezdu tramvaje číslo 3 (typ ČKD T3)	45
<b>2.18</b>	Příklad průjezdu tramvaje číslo 4 na vzdálené koleji (typ Vario LFR)	45

<b>Číslo tabulky</b>	<b>Název tabulky</b>	<b>Číslo stránky</b>
<b>1.1</b>	Tabulka úspěšně a neúspěšně detekovaných tramvají	46

## Úvod

Rozvoj nových technologií a rozmach společenských potřeb přinesl velké využívání optických vláken v průmyslových a technických aplikacích. Optická vlákna mají široké možnosti využití: mohou přenášet data, vést světlo a také je lze využít k měření různých fyzikálních veličin. Měření těchto veličin s rozvojem potřebných komponent jako jsou lasery, fotodetektory či pokročilé metody zpracování informace nám dává záruku velice přesných výsledků a zároveň splňuje i požadavky na nízké pořizovací a provozní náklady. Optická vlákna mají i další nesporné výhody, jako třeba imunitu vůči elektromagnetickému rušení a pasivitu z hlediska napájení elektrickou energií.

Výstupem této diplomové práce je poukázání na základní funkci optických vláken a optovláknových senzorů, praktická část je orientována na sestavení funkčního vzorku vláknově optického senzoru s možností implementace (uložení) do země podél tramvajových kolejí s cílem detekovat projíždějící tramvajová vozidla. Výhody plynoucí z využití optických vláken představují zejména imunitu senzoru vůči elektromagnetickému rušení (dnes s nástupem nových trakčních technologií do hnacích vozidel mají konvenční elektronické typy senzorů problémy s funkční spolehlivostí) a pasivitu z hlediska napájení elektrickou energií, nezanedbatelná je také možnost vzdáleného vyhodnocení dat ze senzoru.

Pro samotné měření tramvajových vozidel bylo nutné sestrojít bytelný senzor, který lze umístit cca 0,5 až 1 metr hluboko pod povrch podél kolejových drah, ale tak, aby byla zachována dostatečná citlivost senzoru, tedy schopnost detekovat projíždějící tramvajová vozidla. Z hlediska aplikovatelnosti a výběru z velké škály optovláknových senzorů se jako zajímavá volba nabízejí interferometrické typy senzorů, které jsou charakteristické velkou citlivostí na měření veličiny. Po úvodních úvahách, konzultacích a prvotním testování byl zvolen jako základ senzoru dvouramenný Mach-Zehnderův interferometr, který nabízí dostatečnou citlivost a zároveň v případě praktické implementace umožňuje snížit cenu výsledného produktu na minimální hodnoty.

Funkčnost senzoru byla testována jak laboratorně, tak primárně praktickými měřeními v reálném tramvajovém provozu města Ostrava pod bezpečnostním dohledem pracovníků Dopravního podniku města Ostrava. Provedeno bylo několik měřicích dní, v rámci kterých byl senzor zatížen různými vlivy počasí, průjezdem různých typů tramvajových vozidel o různém počtu vagónů i rychlosti. Na základě provedených měření senzor vykázal úspěšnost detekce tramvajových vozidel 100 %, tato hodnota je velmi povzbudivá pro navazující výzkum, který se dále zaměří primárně na vliv hloubky uložení, počasí a dalších vlivů.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Optovláknové senzory

Vlastnost vedení světla optickými vlákny dala vzniknout moderním optovláknovým senzorům. U nich se jako zdroj světla většinou používají různé typy laserů nebo pro méně náročné aplikace se používají svítivé diody. Optická vlákna mohou přenášet buď obraz samotný, nebo díky konkrétním daným vlastnostem mohou modifikovat paprsek světla uvnitř vlákna. Vlastnosti upravující paprsek světla v optickém vlákne mohou vycházet už ze základních parametrů optických vláken nebo různými modifikacemi samotných vláken při aplikaci nebo rovnou při výrobě. Optovláknové senzory nesnímají sledovanou veličinu přímo, ale pouze její vliv na světelný paprsek v optickém vlákne. Snímá se tedy změna výkonu nebo změna fáze.

Použití optovláknových senzorů je výhodné, neboť mají malé rozměry, nízkou hmotnost a jsou odolné proti elektromagnetickému rušení. Zároveň jsou také velmi přesné, a to i v porovnání s těmi nejlepšími klasickými senzory.

Optovláknové senzory můžeme rozdělit do dvou skupin: intenzitní a interferometrické.

Intenzitní optovláknové senzory snímají změny intenzity světelného paprsku v optickém vlákne.

Interferometrické optovláknové senzory snímají deformaci světelného paprsku po průchodu vlákem. Interferometrické optovláknové senzory používají k měření dvě optická vlákna. Jedno vlákno je referenční. Zde se snažíme o to, aby měřená veličina ovlivňovala toto vlákno co nejméně. Druhé vlákno slouží jako senzor a měřená veličina by na něj měla působit pokud možno co nejvíce. Světelný paprsek se po průchodu vlákny spojí a na optickém snímači zjistíme odchylky způsobené vlivem sledované veličiny. Největší výhoda interferometrických senzorů spočívá ve vysoké rozlišovací schopnosti za pomoci porovnávání signálů. Dalšími skupinami jsou intrinzitní, kde veličina působí přímo na optické vlákno a extrinzitní, kde veličina působí na prvek vložený do optického vlákna, který upravuje paprsek světla v optickém vlákne.

Pomocí optovláknových senzorů můžeme snímat různé veličiny jakými jsou například teplota, tlak, vibrace, mechanické napětí nebo posuv.

Pro lepší pochopení fungování optovláknových senzorů je nezbytné vysvětlení a popsání základních principů světla a jeho možností šíření. Dále je také nutné vysvětlit a popsat možnosti ochrany a spojování optických vláken (vzhledem k tomu, že senzor je uložený v zemi a jsou na něj kladeny náročné podmínky). Tyto základní informace jsou popsány níže.

## 1.2 Světlo

Je to část elektromagnetického spektra, kterou vnímá lidské oko. Spektrum viditelného světla se pohybuje mezi infračerveným zářením, které má vlnovou délku přibližně 790 nm a ultrafialovým zářením, které má vlnovou délku přibližně 390 nm.

Základní charakteristiky světla jsou svítivost, světelný tok, barva (frekvence, vlnová délka), koherence a polarizace.

Zdroje světla lze podle různých kritérií dělit do skupin. Přirozené zdroje světla jsou hvězdy nebo oheň. Umělé zdroje světla jsou třeba žárovky, zářivky, výbojky, laser. Chromatické světlo je světlo složené z různých barev. Dobrým příkladem zdroje chromatického světla je OLED (Organic light emitting diod) monitor nebo CRT (Cathodray tube) kde se světlo skládá ze tří barev (červená, zelená, modrá (RGB)). Monochromatický (koherentní) zdroj světla má pouze jednu vlnovou délku. Koherentní zdroj světla je třeba laser.

Světlo se ve vakuu šíří rychlostí přibližně  $3 \cdot 10^8$  m/s, ale tato rychlost se mění v závislosti na optickém prostředí. Optické prostředí má vlastnosti, podle kterých jej dělíme na různé druhy. V průhledném prostředí nedochází k rozptylu světla. Průhledné prostředí je například sklo. V průsvitném prostředí se světlo částečně rozptyluje. Průsvitné prostředí je například matné sklo. V neprůhledném prostředí se světlo buď pohltí nebo odrazí. Neprůhledné prostředí jsou třeba kovy. Dalšími typy optických prostředí jsou homogenita, izotropie a anizotropie. Homogenní prostředí má ve všech svých částech stejné optické vlastnosti. Světlo se v tomto prostředí šíří přímočaře a jednotlivé světelné paprsky se mohou protínat bez toho, aniž by se ovlivňovaly. V izotropním se světlo šíří stejně rychle. V anizotropním prostředí se světlo šíří různou rychlostí v závislosti na směru šíření. Příkladem anizotropního prostředí může být krystal křemene.

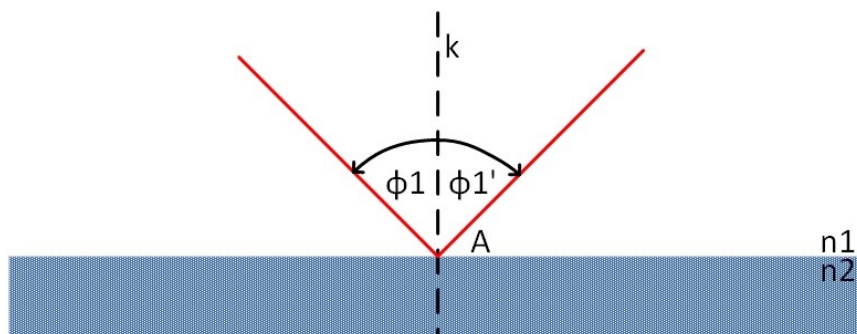
Odraz světla též reflexe světla vznikne tehdy, když paprsek světla dopadne na rozhraní prostředí, do kterého nemůže část nebo celek proniknout. Částečný odraz nastane například v situaci, když posvítíme laserem do mlhy.

### 1.3 Zákon odrazu

Na rozhraní optických prostředí dopadá světelný paprsek v bodě A. Kolmice vztyčená v tomto bodě svírá s dopadajícím paprskem úhel  $\phi$ . V případě, že je rozhraní tvořeno zakřivenou plochou, je kolmice vztyčena na tečnou rovinu v bodě dopadu světelného paprsku. Dopadající paprsek a kolmice dopadu leží v takzvané rovině dopadu. Odražený paprsek se od místa dopadu šíří pod úhlem  $\phi'$ , který svírá s kolmicí dopadu.

Velikost úhlu odrazu  $\phi'$  se rovná velikosti úhlu dopadu  $\phi$ . Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Lom světla též refrakce nastává, pokud světlo prochází z jednoho prostředí do druhého prostředí.



Obrázek 1.1: Odraz světla.



## 1.4 Zákon lomu (Snellův zákon)

V bodě A pod úhlem  $\alpha$  dopadá světlo na rozhraní dvou prostředí. Rozhraní může být rovné nebo zakřivené. Zakřivená plocha je v bodě dopadu světelného paprsku nahrazena tečnou rovinou. Kolmice k této rovině se nazývá kolmice dopadu (k). Světelný paprsek a kolmice dopadu leží v rovině, kterou nazýváme rovinou dopadu. Druhým prostředím směřuje lomený paprsek v bodě A pod úhlem lomu  $\beta$ . Leží v rovině dopadu. Úhel lomu paprsku se měří od kolmice dopadu.

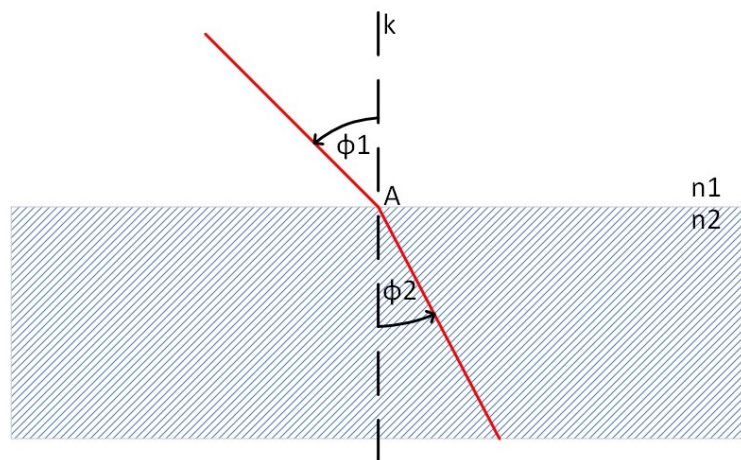
Zákon lomu vyjádřený matematicky je:  $\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_1}{n_2}$

( $n_1$  je index lomu prostředí, kterým paprsek prochází, než dojde k lomu,  $n_2$  index lomu prostředí, do kterého paprsek prochází)

Index lomu  $n$  je poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlost světla v daném prostředí. Matematicky vyjádření je:  $n = \frac{c}{v}$

Lom nastává, pokud světlo prochází z opticky řidšího prostředí do prostředí opticky hustšího, nebo naopak z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího. Opticky hustší prostředí má větší index lomu.

Snellův zákon říká, že při přechodu světla z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí nastává lom světla ke kolmici a pokud světlo přechází z opticky hustšího prostředí do prostředí opticky řidšího, nastane lom světla od kolmice.



Obrázek 1.2: Lom světla.

Při lomu světla může dojít i k úplnému odrazu, pokud je úhel dopadu větší než mezní úhel.

Mezní úhel můžeme vypočítat z matematického vzorce:

$$\frac{\sin \alpha_m}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin \alpha_m}{1} = \sin \alpha_m = \frac{n_1}{n_2}$$

Lom světla je jev, který hraje velkou roli u optických vláken, využívá se také u čoček nebo světlometů.

Nejnázornější příklad lomu světla lze demonstrovat s tyčí ponořenou do vody. Zde platí známé rčení: "Hůl do vody ponořená zdá se býti přelomená".

## 1.5 Disperze světla

Při lomu světla může docházet k rozkladu jeho spektra na jednotlivé vlnové délky. K tomuto jevu dochází v závislosti rychlosti světla v látce na frekvenci. Ve vakuu k disperzi světla nedochází.

Index lomu je také závislý na frekvenci světla, a proto se jednotlivé části spektra lámou pod různými úhly. Největší úhel lomu mají složky s největší frekvencí (fialová) a nejméně zalomené budou složky s nízkou frekvencí (červená).

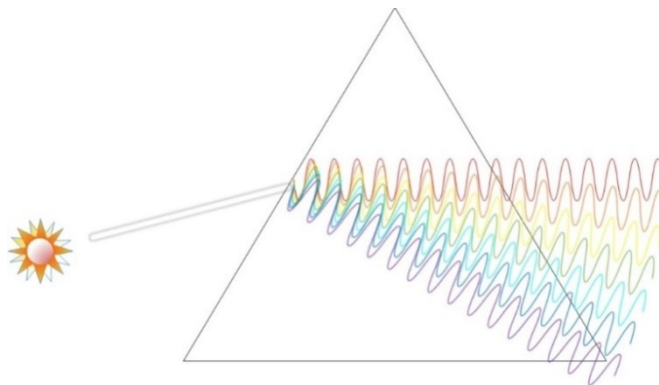
Pakliže světlo přechází do jiného optického prostředí, na rozhraní obou prostředí se nezmění frekvence, ale změní rychlost světla a v závislosti na ní se změní i vlnová délka.

Matematické vyjádření disperze světla je:

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 * f}{\lambda * f} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Světlo rozkládá například optický hranol. V přírodě je názorným příkladem rozkladu světla duha na obloze, když se světlo rozkládá v dešťových kapkách.



Obrázek 1.3: rozklad světla na hranolu.

## 1.6 Optická vlákna

Optická vlákna jsou velmi tenká a vyrábějí se z plastu nebo ze skla. K výrobě skleněných optických vláken je výchozí surovina křemenné, boritokřemičité nebo sodnovápenaté sklo. Polymetymetakryláty nebo také polymetylsiloxany jsou výchozí surovinou při výrobě plastových optických vláken. Samotná výroba optického vlákna může probíhat jednou ze tří metod:

1) Metoda dvojího kelímku; tato metoda je založena na dvou koncentrických kelímcích. V jednom kelímku je roztavený materiál, jenž tvoří jádro a v druhém kelímku taktéž roztavený materiál pláště. Můžeme vytvořit vlákno libovolné délky.

2) Metoda tyčka v trubce; do trubky z materiálu pláště zasouváme natavenou tyčku jádra.

3) Výroba vláken z preformy. Při této metodě se používá na vstupu válec materiálu, ze kterého bude optické vlákno vyrobeno. Tento materiál obsahuje jak materiál jádra, tak i materiál pláště. Při vysokofrekvenčním ohřátí trubky za současného přívodu plynů, které se v plazmě budou rozkládat, vznikne nejprve vrstva pláště a poté se utvoří jádro. Taková optická vlákna slouží k přenosu světla nebo informací pomocí světelného paprsku.

Optická vlákna umožňují přenos značného objemu informací na velké vzdálenosti. Jsou velmi spolehlivá a odolná vůči vnějšímu rušení. Nevýhodou optických vláken je velká náchylnost na ohyb. Pokud je příliš ohneme, můžeme vlákno zlomit. Anebo v lepším případě dojde k porušení podmínky totálního odrazu, čímž se světelný paprsek z vlákna vyváže.

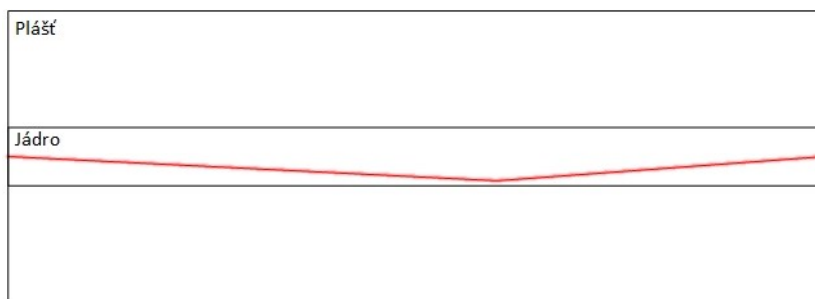
Pro přenos světla lze také použít optická vlákna. Jsou ideální pro osvětlení těsných a nepřístupných prostorů. Existují specifická prostředí, ve kterých nelze použít klasické metalické vedení. Optická vlákna jsou v takovém případě ideálním řešením, protože vedou pouze světlo.

Optická vlákna se dělí na vícevidová a jednovidová. Vícevidové vlákno používá pro přenos informace více světelných paprsků najednou. Vícevidová optická vlákna mohou být gradientní. To znamená, že změna indexu lomu je postupná a světelný paprsek se v optickém vlákně plynule ohýbá. U vláken se skokovou změnou indexu lomu se světelný paprsek láme. Vícevidová vlákna mají oproti jednovidovým vláknům větší průměr a to 50/125  $\mu\text{m}$ . Jednovidová vlákna mají průměr pouze 5-10/125  $\mu\text{m}$  (většinou se používá 9/125  $\mu\text{m}$ ). Pro přenos dat přijatelnou rychlostí se jednovidová vlákna se používají na vzdálenost desítek kilometrů a vícevidová vlákna do dvou kilometrů.

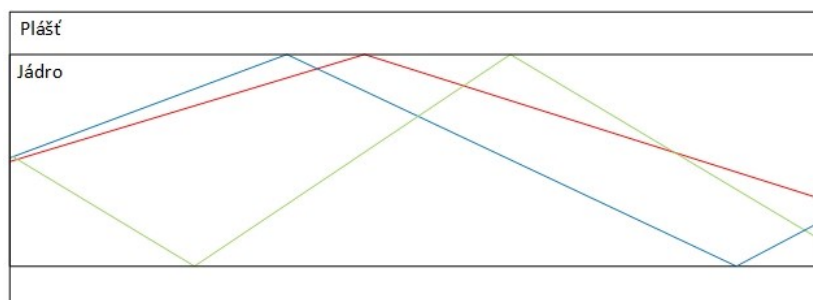
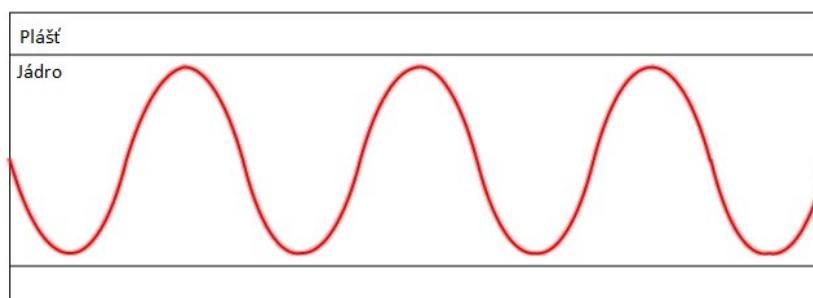
U vícevidových vláken je také dosah omezen módovou disperzí, kdy různé paprsky dorazí do cíle v různý čas, třebaže byly vyslány ve stejný okamžik. Je to způsobeno tím, že každá vlnová délka má jiný úhel lomu.

Důležité parametry optických vláken jsou šířka pásma (MHz), numerická apertura (NA), disperze, útlum (dB), minimální poloměr ohybu, obsah OH (ionty vody).

Nejkratší vlnová délka, při které se vlákno projevuje jako jednovidové, je mezní vlnová délka  $\lambda_C$ . V závislosti na vlnové délce přenášeného paprsku se může jednovidové vlákno stát vícevidovým vláknem. Taková změna se děje postupně se změnou vlnové délky. Běžně se jednovidovým vláknem vysílá paprsek, který má vlnovou délku větší, než je mezní vlnová délka  $\lambda_C$ .



Obrázek 1.4: *Jednovidové optické vlákno.*

Obrázek 1.5: *Vícevidové optické vlákno.*Obrázek 1.6: *Gradientní optické vlákno.*

### 1.6.1 Šířka pásma optického vlákna

Uvádí se v MHz/km. Udává nejvyšší možnou frekvenci signálu, jakou lze přenést na vzdálenost jednoho kilometru spolehlivě a bez přílišného zkreslení signálu kvůli disperzi. Například přenášíme-li více módů v jednom vláknu.

Šířku pásma ovlivňuje vlnová délka optického signálu, materiál použitý při výrobě optického vlákna a také vlastní konstrukce optického vlákna.

Největší vliv na šířku pásma má vlnová délka. Také útlum vlákna je závislý na vlnové délce přenášeného signálu.

### 1.6.2 Numerická apertura

Numerická apertura (NA) je důležitý údaj pro navázání světelného paprsku do optického vlákna. Je to hodnota, která udává největší možný úhel pro navázání světelného paprsku do optického vlákna takovým způsobem, aby tento byl přenášen pouze v jádru optického vlákna.

Numerická apertura je výsledkem sinu maximálního úhlu  $\varphi_a$ , což je úhel, pod kterým paprsek, který vstoupí do optického vlákna, se šíří od začátku až do konce. Pokud by paprsek dopadl na optické vlákno pod větším úhlem, než je maximální úhel, tak se optickým vláknem šířit nebude.

Je to charakteristika optického vlákna, ze které zjistíme, jaký optický výkon lze navázat z okolního prostředí do optického vlákna. Pokud bude tato schopnost navázat optický signál větší, tak dokáže přenést více výkonu.

Světelný paprsek se optickým vláknem šíří pouze pokud je možný úplný odraz paprsku na rozhraní jádra a pláště. Jestliže světelný paprsek překročí mezní velikost úhlu vztaženého k ose vlákna,

tak na rozhraní jádra a pláště dojde k lomu paprsku. Pak se paprsek neodrazí, ale projde do pláště nebo se vyváže z vlákna ven.

Vzoreček pro výpočet numerické apertury:

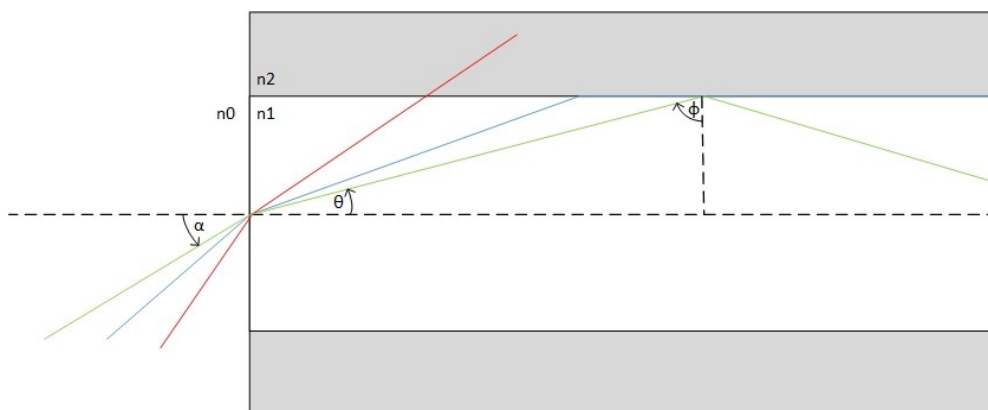
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$n_1$  označuje index lomu jádra

$n_2$  označuje index lomu pláště

Optická vlákna mají plášť a jádro. Jádro je vnitřní válec, kolem kterého je plášť. Plášť musí mít index lomu  $n_2$  menší, než je index lomu jádra  $n_1$ . Při zachování této podmínky lze vlákno použít jak optický vlnovod.

Představme si tři paprsky, každý se bude navazovat pod jiným úhlem. Jeden, který splní Snellův zákon úplného odrazu. A další dva, které se navážou s úhlem, který je takový, že se Snellův zákon totálního odrazu nesplní. První paprsek se tedy naváže a díky odrazu bude pokračovat vláknem dál. U druhého předpokládejme úhel takový, že paprsek se z jádra vyváže a pronikne do pláště. U třetího předpokládejme, že se naváže pod takzvaným kritickým úhlem. Je to takový úhel, že v situaci, kdy by se měl paprsek odrazit a pokračovat v jádru, neodrazí se a dále pokračuje v rozhraní jádra a pláště.



Obrázek 1.7: Navázání paprsku do pláště.

Z tohoto by se dalo vyvodit, že pokud je numerická apertura NA větší, tím větší je účinnost navázání světelného paprsku do optického vlákna a jsou i nižší nároky na úhel, pod kterým je světelný paprsek navázán. Avšak pokud je úhel, pod kterým navážeme světelný paprsek, příliš velký, bude docházet k větším rozsahům ve vzdálenosti, kterou musí světelné paprsky urazit ke konci optického vlákna. Tímto se také může přenášený signál zkreslit. Z toho plyne, že pokud použijeme optické vlákno s vysokou numerickou aperturou NA, snížíme tím šířku frekvenčního pásma.

Při navazování světelného paprsku ze zdroje do optického vlákna vznikají ztráty. Tyto ztráty budou také záviset na vzájemné poloze zdroje a optického vlákna.

Další ztráty, ke kterým dochází, mohou být způsobeny různou velikostí průřezu vyzářovací plochy zdroje a průřezu jádra. Pokud budou tyto průřezy velmi odlišné, budou velké i ztráty.

Ztráty vzniklé různými průřezy zdroje světla a jádra optického vlákna můžeme spočítat pomocí vzorečku:

$$K = 10 * \log\left(\frac{A_C}{A_S}\right) [dB]$$

$A_C$  označuje průřez jádra optického vlákna

$A_S$  označuje plochu světelného paprsku vyzářeného zdrojem na konec optického vlákna

### 1.6.3 Disperze

Jedna z příčin, která způsobuje zkreslení přenášeného signálu je disperze.

Existuje několik druhů disperzí. Vidové disperze jsou způsobené rozdílnou délkou jednotlivých módů ve vícevidovém optickém vlákne. Chromatická disperze nastane, pokud použijeme různé frekvence na jednotlivé módy ve vícevidovém optickém vlákne. Různé frekvence způsobí, že každý paprsek se bude jinak odrážet a na konec optického vlákna dorazí v různém čase. Polarizační vidová disperze se projevuje v jednovidových vláknech. Důvodem je paprsek, který se v jednovidovém vlákne šíří ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách. Jestliže paprsek narazí na nějakou vadu v optickém vlákne nebo bude vlákno příliš ohnuté, začne se každá polarizační rovina šířit jinou rychlostí.

### 1.6.4 Vidová disperze

Při použití vícevidových vláken se projeví vidová disperze. Kvůli různým délkám drah dorazí každý paprsek na konec optického vlákna v různý okamžik. To způsobí i odlišný tvar impulsu a amplitudy na konci optického vlákna.

Vidová disperze se projevuje hlavně u dlouhých vláken, pokud přenášíme data. Toto způsobuje omezení na počet impulsů, které můžeme odeslat v určitém časovém úseku. Pokud budeme přenášet data na vzdálenosti delší než jeden kilometr, dojde k rozdílu v délce drah jednotlivých paprsků a tím i různé době, než se dostanou na konec optického vlákna. Nastane situace, kdy se změní i výstupní impuls a hlavně jeho tvar. Tvar výstupního impulsu se může zkreslit až takovým způsobem, že nedokážeme zjistit, jaká byla původní informace. Pokud bychom vyslali na takto dlouhém vlákne několik obdélníkových impulsů, dostali bychom na konci stejný počet impulsů, ale tyto impulsy budou mít menší amplitudu, budou širší a budou se také překrývat.

Toto způsobuje omezení vzdálenosti, na kterou lze data bezpečně přenést nebo na šířku pásma a tím i na přenosovou rychlost. Pokud chceme, aby impulsy měly na konci vlákna tvar, který lze detekovat, musíme použít pouze určité kmitočty.

Vidovou disperzi lze omezit použitím jiných vláken. U gradientních vláken můžeme vidovou disperzi částečně potlačit. Jestliže použijeme jednovidové vlákno, vidová disperze vůbec nenastane, protože vysíláme pouze jeden paprsek.

### 1.6.5 Chromatická disperze

V reálném světě je téměř nemožné, aby něco bylo ideální, a tedy ani monochromatické zdroje světla nejsou ideální. Kromě námi požadované vlnové délky, vyzařují i spektrum vlnových délek, nacházejících se kolem námi požadované vlnové délky. Protože index lomu závisí na vlnové délce, tak

se jednotlivé vlnové délky daného spektra budou šířit různou rychlostí. Na konec optického vlákna pak dorazí každá vlnová délka daného spektra v různém čase. Na konci optického vlákna se poskládají časově posunuté a budou mít jiný časový průběh než na začátku.

Tento jev nepříznivě ovlivňuje šířku kmitočtového pásma a nutí nás omezit maximální vzdálenost, na kterou můžeme přenášet data.

U běžně používaných jednovidových optických vláknech používáme vlnovou délku 1310 nm, protože se zde chromatická disperze projevuje minimálně nebo vůbec.

#### 1.6.6 Polarizační vidová disperze

Polarizační vidovou disperzi nelze opomenout v případě, že používáme jednovidová vlákna. Paprsek se totiž šíří jednovidovým optickým vláknem ve dvou polarizačních rovinách navzájem kolmých. Každá asymetrie optického vlákna způsobí, že budou se polarizační roviny šířit různou rychlostí a tím může dojít k tomu, že impuls bude zkreslený. K asymetrii optického vlákna může dojít jakkoliv, například nadměrným stlačením, ohybem nebo k němu může dojít už při výrobě. Pokud bude přenos dat rychlejší než 2,5 Gb/s, pak se tato disperze začne stávat důležitou a nelze jí přehlížet. I přesto se polarizační disperze projevuje mnohem méně než ostatní druhy disperzí.

#### 1.6.7 Útlum světelného paprsku v optickém vlákně

V optickém vlákně také klesá přenášený výkon se vzrůstající vzdáleností, podobně jako tomu je u běžných metalických vedení. U optického vlákna udáváme útlum v jednotkách dB/km. Toto je vlastně měřítko udávající ztráty ve vedení světelného paprsku v optickém vlákně. Je to údaj, vyjadřující poměr vstupního výkonu  $P_1$  a výstupního výkonu  $P_2$  a který se vztahuje k vlnové délce.

Můžeme vypočítat pomocí vzorečku:

$$u(\lambda) = 10 * \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) [dB]$$

V optickém vlákně jsou hlavními důvody útlumu optického signálu absorpce a rozptyl paprsků světelného signálu. Ztráty mohou vzniknout přímo v materiálu daného optického vlákna, na rozhraní uprostřed vlákna, ve spojích optických vláken nebo také na různých ohybech (mikroohyby, makroohyby) optického vlákna.

Abychom zjistili celkový útlum optického vlákna, sečteme všechny složky způsobující útlum.

Měrný útlum spočítáme pomocí vzorce:

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_R + \alpha_N + \alpha_{MO} + \alpha_O$$

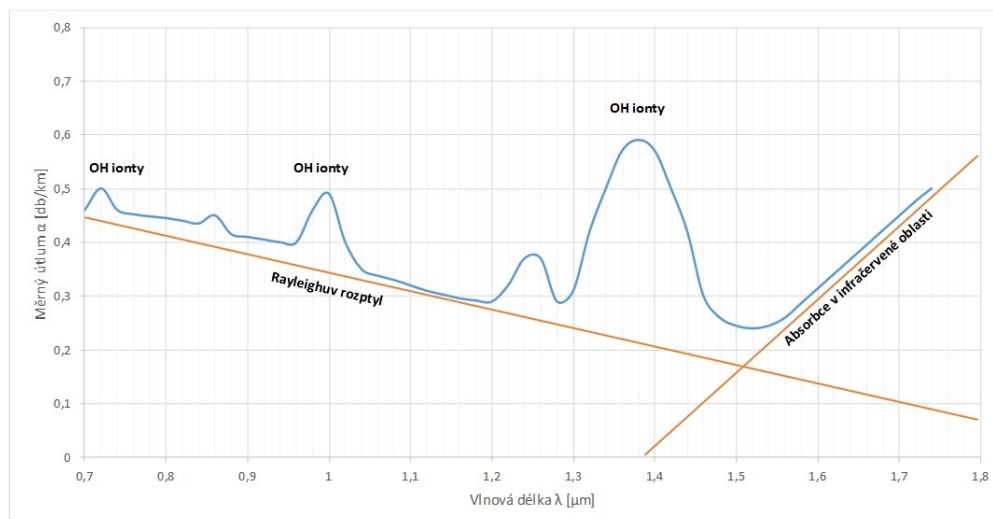
$\alpha_A$  - útlum způsobený absorpcí.

$\alpha_R$  - Rayleighův rozptyl.

$\alpha_N$  - rozptyl vzniklý z důvodu makroskopických neregularit.

$\alpha_{MO}$  - rozptyl vzniklý na mikroohybech.

$\alpha_O$  - rozptyl vzniklý na makroohybech.



Obrázek 1.8: *Útlum paprsku ve vlákne v závislosti na vlnové délce.*

### 1.6.8 Útlum vzniklý absorpcí

V jádru vlákna se paprsek částečně narušuje rozptylem v materiálu a také nevlastní absorpcí čímž dochází ke ztrátám. Tyto ztráty jsou závislé na vlnové délce.

K vlastní absorpci dochází proto, že část světelného paprsku absorbují molekuly materiálu, ze kterého je vyrobeno optické vlákno. Běžně používaný materiál je křemen a ten velice výrazně absorbuje infračervené i ultrafialové spektrum.

Jsou-li v optickém vlákne nějaké nečistoty, dochází k nevlastní absorpci. Nečistoty se do optického vlákna dostávají při jeho výrobě nebo pokud je optické vlákno špatně chráněno proti přírodním vlivům. Pak do něj mohou vniknout ionty kovů (Cr, Cu, Fe) a vody. Pokud použijeme nejvyšší optická vlákna, snížíme riziko koncentrace iontů kovů na hodnotu nižší než  $10^{-9}$  a pro ionty vody  $10^{-7}$ . Někdy při výrobě optického vlákna mohou zůstat OH ionty, které při použití některých vlnových délek působí problémy s absorbováním světelného paprsku.

### 1.6.9 Rayleighův rozptyl

Je to rozptyl v optickém vlákne, kdy části světelného paprsku dopadají na molekuly materiálu, ze kterého je optické vlákno vyrobeno a různě se odrážejí a lámou. Paprsky, které se příliš odkloní, mohou proniknout do pláště a zaniknout.

Rozptyl je způsobený tím, že materiály používané pro výrobu optických vláken nejsou krystalické, ale amorfí. To znamená, že molekuly jsou v materiálu rozmístěny náhodně. To způsobuje různé malé nehomogenity v indexu lomu. Pokud jsou tyto nehomogenity a případné nečistoty malé v poměru s vlnovou délkou, kterou pro přenos používáme, tak tyto ztráty můžeme nazvat Rayleighovy. Takovým ztrátám nemůžeme zabránit a ani je jinak odstranit. Rozptylu těchto ztrát je do všech směrů a tím se část výkonu ztratí.

### 1.6.10 Ohyb vlákna

Pokud vlákno ohýbáme, pak uvnitř jádra optického vlákna dochází ke změně úhlu, pod kterým paprsek dopadá na rozhraní jádra a pláště. Tím se mění úhel odrazu nebo se paprsek může z jádra



vyvázat a ztratit se v plášti. To způsobí, že na konec optického vlákna se dostane menší počet paprsků, než kolik jsme jich vyslali na začátku optického vlákna. V praxi se tomu snažíme vyhnout. Platí tedy, že pokud se chceme vyhnout ztrátám, ohýbáme vlákno co nejméně (zachováváme co největší poloměr). U každého optického vlákna výrobce udává, jak moc jej lze ohnout.

Nejmenší poloměr, kterého můžeme s optickým vláknem dosáhnout, se nazývá minimální poloměr ohybu. Pokud použijeme optické vlákno vyrobené ze skla, bude poloměr ohybu větší, než kdybychom použili optické vlákno vyrobené z plastu. Minimální poloměr ohybu je rovněž závislý na průměru optického vlákna. Čím větší bude průměr optického vlákna, tím větší bude i minimální poloměr ohybu.

Vliv ohybu na útlum v optickém vlákně: Při ohýbání vlákna platí, že s klesajícím poloměrem roste útlum optického vlákna. Ohnuté vlákno je náchylnější na poškození v daném místě.

Ohyby rozdělujeme na makroohyby a mikroohyby.

Makroohyby: Tyto ohyby jsou při běžné práci s optickými vlákny zcela normální. Musíme na ně pamatovat při konstrukci rozvaděčů a spojů. Velikost útlumu je závislá na velikosti ohybu daného vlákna.

Pokud používáme jednojádrová optická vlákna, musíme pamatovat na rozdíly indexu lomu v optickém vlákně. Použijeme-li optické vlákno s větším průměrem, bude optické vlákno náchylnější na ohyby a útlum se bude projevovat výrazněji. Pokud světelný paprsek dopadne na rozhraní jádra a pláště pod příliš velkým úhlem, tak se paprsek vyváže z jádra a pronikne do pláště, kde se ztratí.

Mikroohyby: Tyto ohyby vznikají při výrobě nebo působením okolních sil (například pokud vlákno příliš stlačíme). Na takových ohybech se některé vidy různě odráží nebo pronikají do pláště a tím zaniknou. Důsledkem je, že část vyslaného signálu se ztratí a vznikne útlum.

Pokud by mikroohyb měl poloměr křivosti takový, že by byl srovnatelný s vlnovou délkou světelného paprsku, který používáme, pak to považujeme za poruchu přímocárnosti osy světlovodu. Poruchy tohoto typu vznikají už při výrobě optického vlákna v továrně nebo působením různých sil na optické vlákno. Mikroohyby mohou být velké kolem jednoho milimetru a opakují se zhruba každých několik milimetrů až několik desítek milimetrů. Protože se s mikroohyby setkáme po celé délce optického vlákna, mohou tak velmi výrazně projevit v útlumu. Výskyt těchto mikroohybů je čistě náhodný.

#### **1.6.11 Ztráty na makroskopických neregularitách**

Neregularity jsou hlavně různé nečistoty, bublinky vzduchu, trhlinky a jinak narušený tvar a rozměry hranice mezi jádrem optického vlákna a jeho pláštěm. Ztráty lze omezit zlepšením technologie výroby optického vlákna. Tyto ztráty jsou zahrnuty ve ztrátách vlákna, které jsou udávány výrobcem. Pokud dojde k narušení geometrie optického vlákna, dojde k dalším ztrátám, které musíme přidat.

## 1.7 Spojování optických vláken

Při využití optických vláken je nutné je spojit. Toto spojování je nutné třeba z důvodu omezené délky vlákna při samotné výrobě, dále je nutné vlákna spojovat z důvodu propojení s přístrojem nebo jinou klíčovou komponentou. Spoje dělíme na rozebíratelné a nerozebíratelné. V mé práci je spojování optických vláken nezbytnou součástí a bylo nutné vybrat konektory, které jsou cenově přijatelné, ale zároveň velmi kvalitní z důvodu přesnosti měření. Další možností, jak sestrojit a případně i zlepšit funkci senzoru je využití nerozebíratelného svařovaného spoje.

Rozebíratelné spoje jsou založeny na velkém množství různých konektorů. Na konektory jsou kladeny vysoké nároky, protože na konektorech dochází ke ztrátám přenášené energie. Při používání menších průměrů jádra vláken, nároky na konektory ještě stoupají. Z důvodu omezení ztrát musí vlákna ležet v jedné ose a zároveň být v co nejtěsnějším kontaktu obou styčných plošek. Tyto styčné plošky musí mít opticky upravený povrch. Další sledovanou vlastností konektorů je jejich spojování, které by mělo být snadné, ale zároveň dostatečně robustní, aby vydržely i velký počet rozpojení a znovuzapojení.

### 1.7.1 Konektory

Konektory optických vláken se vždy skládají z ferule a krytu. Útlum konektoru je ovlivněn typem ferule. Ferule mají čtyři typy. Prvním typem je FC (FlatContact), jenž má největší útlum. Tento typ se vyznačuje rovným čelem a útlumem zpětného odrazu  $< -30$  dB. Druhý typ je PC (PhysicalContact), který se oproti typu FC má čelo leštěné a vypouklé. Útlum druhého typu je  $< -35$  dB. Pro další zmenšení útlumu vznikly ferule typu UPC (Ultra PhysicalContact). Rozdíl oproti typu PC je více vypouklému čelu. Díky této úpravě útlum dosáhl  $< -55$  dB. Nejmenšího útlum dosahuje čtvrtý typ ferule APC (AngledPhysicalContact). Tato ferule má čelo leštěné pod úhlem  $8^\circ$ . Útlum tohoto typu je  $< -65$  dB. Feruli typu APC používám ve svém senzoru.

Životnost konektoru ovlivňuje materiál ferule. Každý materiál má jiné přednosti, ale i slabiny. Aluminiové ferule se obtížně leští, mají velkou tepelnou roztažnost a jsou křehké. Ferule vyrobené z plastu jsou nejlevnější a snadno se leští. Nevýhodou plastových ferulí je větší útlum a nižší životnost. Ferule z kompozitu lze vyrobit nejpresněji, navíc mají velmi malé opotřebení otěrem a malý vložný útlum. Kompozitní ferule jsou velmi drahé, ale i přesto jsou tyto ferule nejlepší volbou. Zirkonové ferule se velmi dobře leští a otěr je opotřebovává málo. Další výhodou zirkonových ferulí je velká pevnost v ohybu. ARCAP ferule mají velmi vysokou životnost a lze je přizpůsobit i vláknům s velkými průměry. ARCAP ferule se také dobře leští a opotřebení otěrem je zanedbatelné.

### 1.7.2 Svařované spoje

Při této metodě dochází k natavení čel vláken a jejich spojení. Jsou tři metody: svařování plynovým plamenem nebo  $\text{CO}_2$ , laserem a svařování elektrickým obloukem. Poslední jmenovaná se dnes využívá nejčastěji.

Ochrana spojů po svařování: Vláknem v místě sváru a samotný svár jsou velice křehké, a i při malém tlaku na ohyb by mohlo dojít ke zlomení. K ochraně sváru se používá smršťovací trubička s kovovou výztuhou.

### 1.7.3 Ochrana optických vláken

Nejvíce jsou optická vlákna náchylná na vlhkost. Vlhkost totiž u optických vláken způsobuje takzvané oslepnutí. Proto jsou optická vlákna chráněna ochrannými obaly ihned po procesu tažení. Vlákná mohou být chráněna buď těsnou primární ochranou nebo různými gely. Gely se používají i v případě, je-li v chráničce vedeno více vláken. V mojí práci jsou běžné ochrany optických vláken dále doplněny, protože základní ochrana by při uložení v zemi mohla být poškozena nebo by mohla rychleji degradovat.

Ochrana optických kabelů proti biologickým vlivům: Protože je optovláknový senzor implementován v zemi, je zde uvedena i základní podkapitola zaměřující se na ochrany optických vláken. Vnější podmínky jako zemina mohou obsahovat biologické škůdce, kteří jsou jedním z největších problémů, které hrozí optickým kabelům a je nutno je vzít do úvahy při implementaci senzoru do země. Proti poničení optických kabelů se používá pancéřování ocelovými dráty nebo ocelovou páskou. Jinou možností je použití HDPE (High Density PolyEtylen) chrániček, které mají záměrně větší vnější průměr tak, aby hlodavci nemohli dostatečně rozevřít čelisti a rozkousat chráničku. Mravenci navrtávají dírký do optických kabelů a naleptávají je kyselinou mravenčí. Řešením je použití nylonového pláště.

Základní materiály plášťů optických kabelů:

#### A) PVC

PVC (Polyvinylchlorid) byl v minulosti nejpoužívanějším materiálem při výrobě kabelů. Při běžných teplotách je měkký a ohebný, ale při nízkých teplotách okolo  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  křehne a praská. Odolává plísni, tažným silám a UV záření. PVC je dlouho ohnivzdorný, ale při hoření unikají velmi jedovaté zplodiny. Nejčastěji se používá u propojovacích kabelů díky své měkkosti a ohebnosti.

#### B) Polyuretan

Jeden z nejlepších materiálů pro všechny podmínky. Snese i mrazy a většinu chemikálií kromě alkoholu. Nízká hořlavost, při hoření se uvolňuje jen málo jedovatých zplodin. Je to materiál pružný a velmi tvrdý. Používá se v nejextrémnějších podmínkách nebo pro vojenské účely.

#### C) HDPE

HDPE má výbornou odolnost proti vodě, UV záření a chemikáliím. Výjimkou je nafta, která HDPE rozpouští. Snadno hoří, ale nevzniká tolik jedovatých zplodin jako u PVC. Povrch má malý koeficient smykového tření. Jeho využití je tedy vhodné pro tažení v chráničkách, které jsou z tohoto materiálu také často vyráběny.

#### D) Nylon

Nylon je velmi tvrdý materiál, který má nízký koeficient tření. Je hořlavý bez halogenových zplodin. Není odolný proti alkoholu. Nedokáže zabránit průniku vlhkosti do kabelu.

## 1.8 Interference

Je to skládání vlnění. Tedy, že jedno vlnění ovlivňuje jiné. Pokud se jedná o interferenci světla, projeví se světlo jako vlnění. Pokud by se jednalo o mechanické vlnění, sečteme okamžité

výchyly. U elektromagnetického vlnění taktéž sečteme okamžité výchylky jak elektrické složky, tak magnetické složky. Pro vznik interference je zapotřebí mít dva nebo více zdrojů vlnění.

Pokud budou mít stejnou frekvenci, signál se nezmění nanejvýš zesílí. Bude-li frekvence odlišná, signály se smíchají a výsledný signál bude součtem jednotlivých složek v každém okamžiku.

### 1.8.1 Koherence záření

Jde o záření, které má konstantní vlnovou délku a rozdíl fází jednotlivých paprsků se nemění. Pro lepší koherenční vlastnosti můžeme zvýšit monochromaticnost (vysílání pouze jedné frekvence a ne úzkého spektra) a také pomůže ohraničení velikosti zářící plochy zdroje. Pokud ohraničíme velikost zářící plochy zdroje, pak zlepšíme prostorovou koherenci. Zlepšení monochromaticnosti se pozitivně projeví na časové koherenci.

### 1.8.2 Časová koherence

Ideální zdroj koherentního záření vysílá v každém okamžiku a celou plochou svého povrchu monochromatické záření. Pokud zdroj není ideální, bude vyzařovat určité úzké spektrum kolem námi požadované frekvence. Okolní frekvence, které jsou obsaženy ve spektru, budou tvořit zázněje. Signál bude kolísavý. Délku záznějů můžeme vypočítat pomocí vzorce:

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f}$$

L - délka zázněje.

$\lambda$  - vlnová délka.

$\Delta\lambda$  - spektrum okolních vlnových délek.

c - rychlost světla.

$\Delta f$  - spektrum okolních frekvencí.

Pokud chceme použít koherentní zdroj světla, musíme myslet na to, že dobrou interferenci můžeme dostat pouze tehdy, když použijeme superpozici paprsků vzájemně si velmi podobných a jejich rozdíl bude menší než koherenční délka L.

### 1.8.3 Prostorová koherence

Čím menší je tato koherence, tím více se světlo šíří do stran. Prostorovou koherenci vyjadřujeme pomocí koherenční šířky. Vzdálenost mezi osou hlavního svazku paprsků a místem kde už je minimum intenzity značíme R a nazýváme ji koherenční šířkou.

Koherenční šířku můžeme vyjádřit pomocí vzorečku:

$$R = a \frac{\lambda}{2 * 2r}$$

a - vzdálenost zdroje od stínítka

2r - velikost zdroje záření

$\lambda$  - vlnová délka

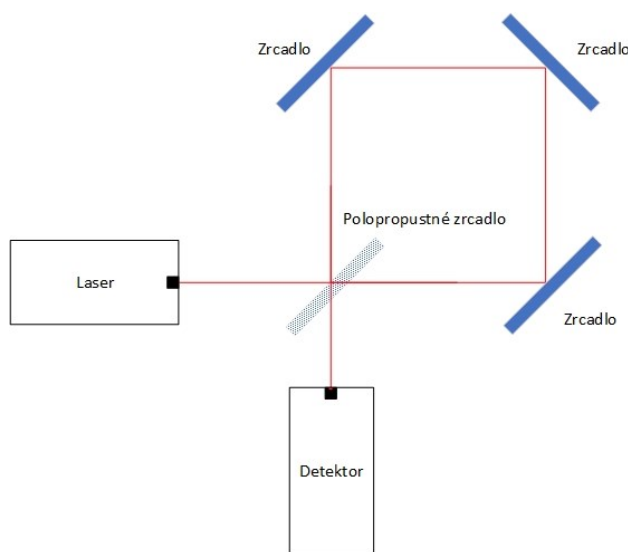
## 1.9 Interferometrie

Optickými analytickými metodami založenými na interferenci světla jsou refraktometrie a interferometrie. Refraktometrie měří přímo index lomu. Interferometrie se zabývá měřením rozdílu indexu lomu mezi známým prostředím, které je definováno indexem lomu a neznámým prostředím. Při tom se využívá ohybu a interference světla na šterbině. Z rozdílů indexů lomu je možno určit analytickou koncentraci měřené látky, vzorku.

### 1.9.1 Interferometry

Interferometry jsou velmi přesné měřicí přístroje, jejichž princip je založen na interferenci světla. Protože se v interferometrech používají velmi krátké vlnové délky (přibližně stovky nanometrů), můžeme rozlišit i velmi malé změny v měřené veličině. Měřit můžeme délku, index lomu a spoustu dalších veličin, které neměříme přímo, ale projeví se nějakou změnou (interferencí) na světelném paprsku, který poté můžeme vyhodnotit. Pomocí interferometrů se dnes měří vzdálenosti, teplota a tlak plynů nebo také plazmatu. Pomocí interferometrů můžeme také studovat různé povrchy nebo měřit index lomu kapalin nebo také plynů. Nejpoužívanější typy interferometrických zapojení jsou uvedeny níže.

### 1.9.2 Sagnacův interferometr

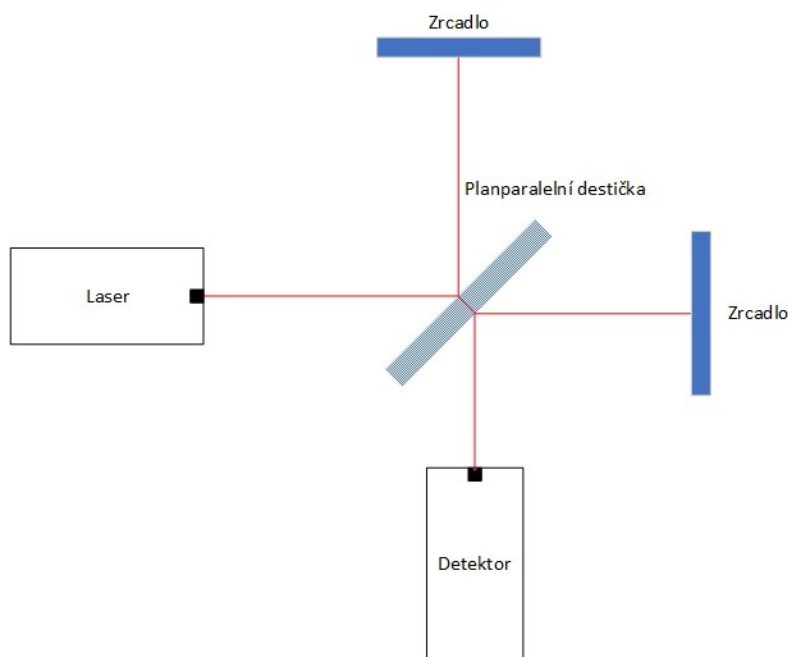


Obrázek 1.9: *Sagnacův interferometr.*

Sagnacův interferometr můžeme vidět v laserových interferenčních gyroskopech. Tento interferometr byl vynalezen v roce 1913 francouzským fyzikem, jenž se jmenoval Georges Sagnac. Základní částí tohoto interferometru je světelný zdroj, který vyzařuje monochromatické světelné paprsky. Tyto paprsky směřují na polopropustnou destičku, která je rozdělí na dvě části. První část paprsku se přes tuto destičku dostane a dopadá na soustavu zrcadel, která tento paprsek odráží proti směru hodinových ručiček. Druhá část původního paprsku se od polopropustné destičky odrazí a soustavou zrcadel prochází po směru hodinových ručiček. Protože paprsky procházejí stejnou soustavou zrcadel, jen s rozdílem směru, bude dráha obou paprsků stejně dlouhá. Protože je tedy pro oba paprsky stejně dlouhá dráha, budou oba paprsky spolu interferovat ve stejné fázi. Otáčením

interferometru ve směru hodinových ručiček nastane situace, kdy paprsek, který půjde soustavou zrcadel v protisměru hodinových ručiček, urazí kratší cestu než paprsek, který putuje ve směru hodinových ručiček. Tím dojde k tomu, že paprsky budou mezi sebou interferovat s odlišnou fází. Toto platí i pro změnu směru otáčení. Takže pokud bychom otáčeli proti směru hodinových ručiček, paprsek, který půjde ve směru hodinových ručiček, bude mít cestu kratší než paprsek, který půjde proti směru hodinových ručiček.

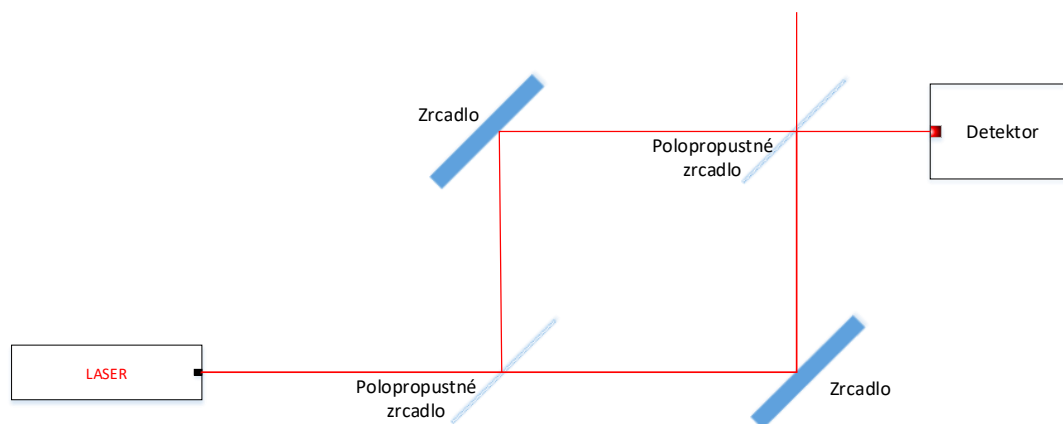
### 1.9.3 Michelsonův interferometr



Obrázek 1.10: *Michelsonův interferometr.*

Používá se pro měření kvality zrcadel nebo jiných ploch, které lámou nebo odrážejí světlo. Tento interferometr byl poprvé sestaven v roce 1887. Tvůrcem tohoto interferometru byl Albert Abraham Michelson. Využívá se zde skládání, jinak také interference, světelného vlnění. Původní tvůrce Michelson použil k pokusu rtuťovou výbojku, ale dnes se již používají lasery. Paprsky z laseru dopadají na tenkou skleněnou destičku, která má obě strany rovnoběžné a je natočena pod úhlem  $45^\circ$ . Této destičce se říká planparalelní. Na této destičce se paprsek zároveň odráží a láme. To způsobí, že se paprsek rozdělí na dvě části. Lomené paprsky se poté odrazí od zrcadla a vrací se na destičku, kde se lomily. Na této destičce se odrazí a putují dále do detektoru. Podobně tomu je u odražených paprsků. Tyto paprsky se rovněž odrazí od zrcadla a vrací se na destičku, kde se odrazily. Tentokrát se ale na destičce zlomí a projdou dále na detektor. Pokud bude zrcadlo, na které dopadá lomený paprsek, v jiné vzdálenosti než zrcadlo, na které dopadá paprsek, který je odražen, bude na detektoru zaznamenáno interferenční maximum nebo minimum.

### 1.9.4 Mach-Zehnderův interferometr

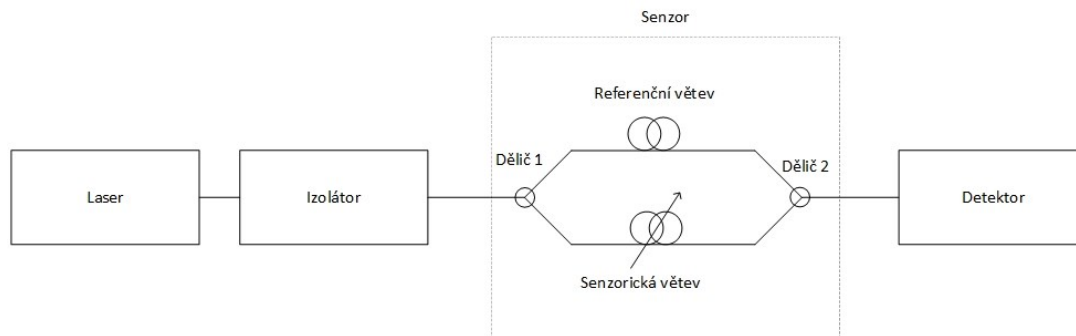


Obrázek 1.11: *Mach-Zehnderův interferometr.*

Za vznik tohoto interferometru vděčíme Ernstu a jeho synovi Ludwigu Machovi, kteří tento interferometr postavili v roce 1891. Nezávisle na této dvojici stejný interferometr sestrojil i Ludwig Zehnder. Zdroj světelných paprsků musí být monochromatický. Tyto paprsky dopadnou na destičku, která je polopropustná a původní světelný paprsek rozdělí na dva paprsky. Jeden paprsek je referenční a druhý je měřicí, někdy též předmětový. Pokud potřebujeme měřicí paprsek rozšířit, můžeme paprsek pomocí čoček upravit tak, abychom dosáhli většího průměru. Podobně jako jsme rozšířili měřicí paprsek, můžeme rozšířit i referenční paprsek. Měřicí paprsek poté prochází transparentním předmětem. Tím dojde k deformaci paprsku. Poté co měřicí paprsek projde prostorem, který měříme, se opět setká s referenčním paprskem. Oba paprsky se setkávají na polopropustném zrcadle. Pak se rozdělí na dvě větve a putují dále na detektory. Nebo se sloučí a měříme jaký je rozdíl mezi referenčním a měřicím okruhem. Díky tomu, že máme dva okruhy (referenční a měřicí), je tento interferometr vhodný pro měření, kde potřebujeme něco srovnávat. Proto se tento interferometr používá například v aerodynamických tunelech. V těchto tunelech porovnáváme tvar obrazců, které vznikají díky různým tlakům a indexům lomu. Pro použití tohoto interferometru je nutné použít vysoce kvalitní polopropustné destičky, zrcadla i čočky.

### 1.9.5 Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr

Níže je uvedeno zapojení Mach-Zehnderova interferometru, které využívá jednovidová optická vlákna pro svou funkci. V praxi se nejčastěji setkáme právě s tímto typem interferometru.



Obrázek 1.12: *Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr.*

Jako zdroj světla je využit laser s úzkou spektrální čarou. Pro převod interferujícího vlnění na elektrický signál je využit fotodetektor (různé typy), který zaznamená signál vzniklý následkem interference z referenčního a senzorového vedení interferometru. Působení měřené veličiny na senzorické vedení způsobuje změnu fáze signálu. Problémem senzorů snímajících změnu fáze optického signálu může být jejich vysoká citlivost a složitější konstrukce (pro nalezení vhodného frekvenčního rozsahu).

## 1.10 Optické senzory v dopravě

### 1.10.1 Vláknově optické a optické senzory

Činnost senzorů spočívá ve využití optických vláken a podle způsobu jejich uplatnění se využívá různých principů. Také se přihlíží k výhodám různých senzorů, jakými jsou například spolehlivost, přesnost, vysoká citlivost, široký teplotní rozsah, chemická a elektromagnetická odolnost. Pro specifické aplikace v informačních a komunikačních sítích jsou tedy výhodnější než běžné metalické kabely. Optická vlákna také dala vzniknout hybridním sítím, kde se využívá optické vlákno jako senzor citlivý na danou veličinu a současně slouží optické vlákno pro přenos datových informací. [26-30]

### 1.10.2 Optické senzory a aktivní infračervené senzory

Již ustupující technologie, která využívá princip vysílání a příjmu optického paprsku mezi dvěma referenčními body. Tento paprsek může být jak infračervený, tak laserový. Pro měření rychlosti vozidel lze tuto metodu využít tak, že zdroj bude umístěn v definované vzdálenosti vedle detektoru, který zaznamenává paprsky odražené od projíždějících vozidel. [31-35]

### 1.10.3 Technologie DAS (Distributed Acoustic Sensor)

Tato technologie vyhodnocuje zvuk pomocí Rayleighova rozptylu. Do vzdálenosti 40 km umožňuje pracovat s rozlišením až 1 m. Fázový posuv ve zpětně rozptýleném světle je způsoben akustickými vlnami, které jsou absorbovány molekulami v jádře vlákna. Tento posuv je detekován vyhodnocovací jednotkou, která jej analyzuje. Výhodou této technologie je možnost použití běžných jednovíkových optických vláken, která jsou již uložena v komunikačních trasách. [36-37]



#### 1.10.4 Technologie POTDR (Polarization Optical Time Domain Reflectometry)

Využívá distribuované intrinziční optické senzory a slouží k monitorování silničního provozu v reálném čase. Technologie POTDR má výhodu velkého dosahu s vysokým rozlišením. Možností využití této technologie je měření rychlosti v dopravě. [38]

#### 1.10.5 Technologie LIDAR (Light Detection And Ranging)

Tato technologie slouží především pro měření vzdálenosti, ale využít ji lze i pro mapování terénu, měření atmosférických jevů, ale i jiné aplikace. 3D model, který můžeme zpracovat díky této technologii je výsledkem velkého množství bodů, které nasnímá. Systém vyše záření o vlnové délce 1060 nm až 1540 nm a pro vyhodnocení veličiny, kterou potřebujeme se využije doba šíření pulzu odraženého od měřeného objektu. V kolejové dopravě pomáhá s detekcí projíždějících vozidel v bezprostřední blízkosti nebo také s monitorováním kolejiště pod soupravou. Pro monitorování kolejiště se senzory umísťují do speciálních držáků nacházejících se vespod vozů soupravy. Lidar umožňuje detekci objektů v rozmezí od 0,2 m do 10 m. Snímací schopnosti tohoto systému jsou ovlivněny rychlostí snímaného vozidla a počtem snímků. Tento systém umožňuje detekovat přítomnost soupravy a také měřit zakřivení kolejí, rychlost soupravy, délku soupravy. LIDAR sice není ovlivněn slunečním zářením, ale negativně jej ovlivňují zhoršené povětrnostní podmínky, mezi které patří například mlha. [39-42]

#### 1.10.6 Distribuované senzory

Prvním způsobem fungování vláknově optického distribuovaného systému založeného na měření Brillouinových frekvencí slouží k měření mechanického namáhání. Brillouinovy frekvence jsou závislé na mechanické zátěži vlákna a současně na jeho tepelném namáhání. Díky tomu můžeme získat prostorovou charakteristiku namáhání po délce koleje. Této prostorové charakteristiky se využívá pro monitorování tunelů a železničních mostů. Jelikož je měření závislé jak na mechanickém namáhání, tak i na teplotě, tak je měření přesné pouze za předpokladu stejné teploty po celé délce koleje. Uchycení pomocí tmelu nebo mechanického spojení s kolejí velmi ovlivňuje měřené frekvence. Proto musí být uchycení po celé délce stejné dostatečně pevné a co nejméně pružné. Pokud by nebylo uchycení po celé délce stejné dojde k přenosu informace do vlákna nerovnoměrně a tím výrazně ovlivní přesnost měření. Použit lze pouze speciální typy optických vláken, ale vzhledem k cenové relaci oproti standardnímu telekomunikačnímu optickému vláknu je přibližně 100krát dražší. Tento systém je vhodný spíše pro měření statických zátěží, kvazistatických zátěží a určení směru kolejové dopravy.

Druhým způsobem je měření útlumu metodou OTDR (Optical Time Domain Reflectometry). V tomto případě se vyhodnocuje zpětný Rayleighův rozptyl v optickém vlákne. Díky tomu, že jsou zde vyhodnocovány lineární rozptyly, je možné použít telekomunikační optická vlákna a celý systém je proto levnější. Měření metodou OTDR také umožňuje zvýšit dynamiku měření na cca 15-30 sekund. Jedná se o distribuované měření, což značí, že získáváme informace o mechanickém namáhání působícím podél celého vlákna. Měříme výkon, který se šíří optickým vláknem ve zpětném směru. Úroveň tohoto výkonu je relativně malá. Větší problém způsobuje citlivost na všechny vlivy podél optického vlákna, které změny výkonu. Takovými vlivy jsou: teplota, mechanické namáhání, ohyby, způsob uchycení optického vlákna ke kolejí, které by mělo být stejné podél celého vlákna. Hlavní nevýhodou je používaná vlnová délka, která je totožná s vlnovou délkou používanou pro komunikaci

po optických vláknech. Proto nelze využít již existující a používaná optická vlákna, která slouží k přenosu dat. Metoda OTDR je vhodná k monitorování rychlosti kolejových vozidel, jejich identifikaci a také směru jízdy. S touto metodou lze také monitorovat celistvost kolejí, které se vlivem teplotní roztažnosti prodlužují a může docházet k deformacím. Monitorováním celistvosti kolejí můžeme předcházet nehodám. [43-53]

#### 1.10.7 Výkonové (intenzitní) senzory

U tohoto typu senzoru se vyhodnocuje optický výkon na výstupu vlákna. Tento výkon je ovlivněn relativním pohybem obou konců dvou vláken proti sobě. Výkonové senzory snímají s vyšší dynamikou než dříve uvedené řešení, kdy lze detekovat změny v jednotkách až několika desítkách kHz. Optický výkon ovlivňuje teplota okolního prostředí a silně limitované rozkmity, které také omezují dynamický rozsah měřených změn, což je nevýhoda tohoto řešení. Za další nevýhodu lze považovat nutnost instalovat jeden snímač na každé měřicí místo, neboť se jedná o bodové měření. Měření optického výkonu má elektrický výstup, proto je nutné mít také zdroj elektrické energie v každém místě měření. Výhodou tohoto řešení je vyšší odolnost a robustnost. Výkonové senzory lze využít pro detekci kolejové soupravy, směru jízdy nebo i monitorování rychlosti. [54-55]

#### 1.10.8 Senzory detekce mikroohybů v optickém vlákně

Tyto senzory jsou založeny na detekci mikroohybů v rámci struktury optického vlákna. Deformační elementy, které působí na vlákno a působí periodické zvlnění, jsou podstatou detekce deformace optického vlákna. Změny se projeví na výstupním výkonu, který optické vlákno přenáší. Problémem tohoto řešení je degradace způsobená opakovanou deformací optických vláken. Detekce nebo měření rychlosti kolejové soupravy je umožněna díky tomu, že je senzor dostatečně rychlý a je schopen zachytávat dynamické změny ve stovkách Hz. [56-57]

#### 1.10.9 Technologie FBG (Fiber Bragg Grating)

Aplikace s Braggovskými mřížkami se dnes velmi rozšířily. V kolejové dopravě jsou asi nejrozšířenější. Kolejová vozidla se vyznačují velkou hmotností, která působí na koleje. Proto se kolejnice při průjezdu dopravního kolejového vozidla mírně deformují. Nejvíce se deformace projevují na spodku kolejnice v podélném uchycení nebo podélně na patce kolejnice. Senzory využívající Braggovské mřížky mohou při různých počtech, formách zapouzdření a umístění na kolejnici detekovat parametry, které nám pomohou určit směr jízdy kolejových vozidel a jejich rychlost. Dalšími možnostmi jsou detekce souprav, jejich počet a zrychlení. [58-68]

#### 1.10.10 Interferometrické senzory

Optovlákonové interferometry, které jsou velmi citlivé, je možné využít při volbě vhodné konstrukce jako akustické senzory. Tyto senzory využívají akustické odezvy, kterou způsobuje každé kolejové vozidlo, na senzorické větvi. To umožňuje zaznamenávat jak průjezdy souprav, tak i jejich rychlost, pokud použijeme dva senzory v definované vzdálenosti. Jednou z možností je užití Fabry-Perotova interferometru přímo v pražcích. Toto řešení ani v dlouhodobém měřítku nevykazuje degradaci a lze jej využít pro čítání náprav, detekci směru jízdy a při využití více senzorů i pro měření rychlosti. Další typy senzorů využívají vibrační odezvy na senzorické větvi. Tato senzorická větev je připevněna přímo na kolej a referenční větev je společně s vyhodnocující technikou mimo koleje. Senzory s přímým kontaktem s kolejnicí mohou sloužit jako čítač náprav, a tedy i detekovat kolejové

vozidlo. Existují také čítače náprav kolejového vozidla na bázi optovláknového interferometru, jejichž základní princip spočívá v mnohavidovém vlákně připevněném v hlavě kolejnice. Při průjezdu kolejového vozidla dochází k tlaku na vlákno a tím se mění Specklův obrazec. [69-71]

## 2 Praktická část

### 2.1 Vlastní konstrukce senzoru s M-Z interferometrem

Pro vlastní funkci vytvořeného funkčního vzorku vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru byla použita optická vlákna s děličem optického svazku v poměru 1:1 dle instrukcí vedoucího práce. Kvůli potřebě měření v pod povrchem země bylo potřeba senzor umístit do bytelného šasi. Prvotní pokusy s jeho zhotovením z pozinkovaného plechu o síle 0,5 mm ale nebyly úspěšné. Po umístění do země a provedení základních zátěžových testů neprokázalo šasi pro senzor dostatečnou odolnost a docházelo k mírným deformacím šasi. Pro další postup se zdálo využití tohoto materiálu jako nevhodné. Proto se jevilo jako možné lepší řešení vyrobit šasi senzoru z nerezové oceli. Díky vstřícnému přístupu vedoucího technologa firmy Triom s.r.o. se sídlem Frenštát pod Radhoštěm vzniklo šasi z nerezové oceli. Po provedení základních zátěžových testů pod vedením technologa firmy se na novém šasi neprojevovalo žádné poškození. Pro samotnou funkci interferometrického senzoru je podstatné, aby jedna větev (měřicí rameno senzoru), která vychází z děliče, byla vedena jako referenční. Aby byla dobře zajištěna před působením měřené veličiny, bylo třeba ji vhodně ochránit. V tomto kroku se nabízela dvě vhodná řešení.

První pokus spočíval v tom, že do nerezového pláště byly vloženy dvě polystyrenové desky o tloušťce pět centimetrů. V jedné z nich je vypálený prostor tak, aby vyhovoval bezpečnému uložení děličů a optického vlákna. Druhá deska slouží pro zakrytí a zajištění stability celé vnitřní konstrukce. Druhý pokus, který zůstal jako finální řešení, využívá pro zlepšení izolace referenční větve protihlukový molitan o síle 65 mm po konzultacích s vedoucím práce. Výstelka z akustického molitanu má rovněž dvě vrstvy stejně jako polystyren. Výhodou tohoto řešení je zlepšení izolace referenční větve a zjednodušení konstrukce, protože není nutné vypalovat prostor pro uložení optických vláken a děličů.

Senzorická větev byla vyvedena z izolačních vrstev na spodní část šasi, kde je uchycena zpevněnou lepící páskou. Pro vývod optických vláken (vstupní a výstupní část) bylo potřeba odměřit potřebnou výšku, a vyvrtat v šasi dva otvory o průměru 10 mm. Optická vlákna jsou utěsněná silikonem a umístěná v ohebné chráničce kabelů, známé pod označením husí krk. Ten je do otvorů v šasi pevně uchycený jednosložkovým polymerovým lepidlem. Víko je ke zbytku šasi přišroubováno. Jako ochrana vůči vnějšímu prostředí slouží jeho překryvná část. Odolná konstrukce interferometru umožňuje umístění pod povrch země a dlouhodobá měření tramvajových vozidel.

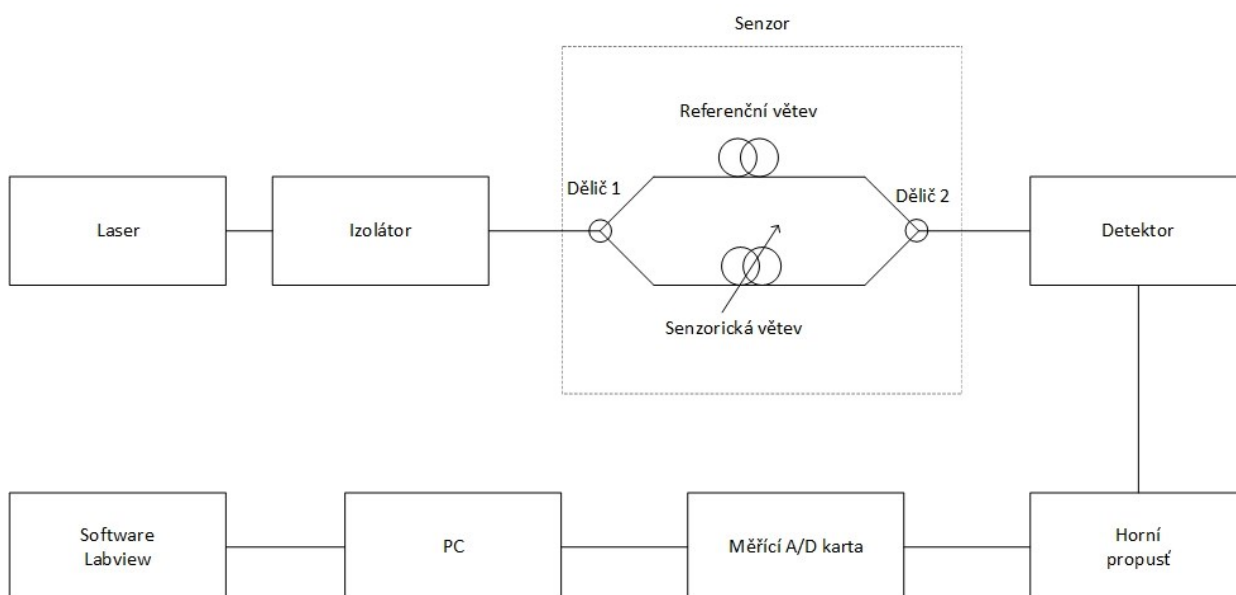
### 2.1.1 Použité přístroje pro měření

Jako zdroj světla byl využit laser typu DFB (Distributed feedback laser se zpětnou vazbou) s výkonem v rozsahu 1 až 5 mW, pro celou dobu měření byl využit výkon 3 mW. Isolátor slouží k jednosměrnému propouštění světla. Zabraňuje tedy odrazům světla vracet se do laseru.

Ke snímání světelného paprsku a jeho převod na napětí po průchodu senzorem nám slouží detektor Thorlabs typu PbSe (Plumbum, Selenium – Olovo a selen), který umožňuje i zesílení signálu. Tento typ byl použit po dohodě s vedoucím práce.

Filtr typu horní propust (HP) nám slouží k filtraci nežádoucích signálů (např. vlivu teploty apod.), které se projevují na nižších frekvencích a leží mimo měřený užitečný signál tvořený průjezdem kolejového vozidla [72]. V mé měřicí soustavě má horní propust hodnotu  $f_0$  nastavenou na 2 Hz, tato hodnota se jevila jako dostatečná viz [72].

Měřicí karta, kterou používáme, je typ National Instruments NI USB 6210. Počítač, který nám slouží k zobrazování výsledků, využívá software Labview 2014.



Obrázek 2.1: Kompletní schéma využití při měření vláknově optického M-Z interferometru.

### 2.1.2 Popis konstrukce senzoru



Obrázek 2.2: Nerezové šasi s již přilepenou senzorickou částí Mach-Zehnderova interferometru.

Testováno bylo několik různých možností uložení a upevnění optických vláken a jako nejvhodnější se ukázalo uložení, které vidíme na snímku 2.2. Při instalaci senzorické větve byly uloženy obě vlákna současně a rovnoměrně na danou plochu šasi pro senzor, tak aby byla zajištěna maximální styčná plocha měřicího optického vlákna (ramene) s šasi senzoru (docíleno je tím maximálního přenosu vibračně-akustických projevů od průjezdu kolejového vozidla na senzor).



Obrázek 2.3: Příprava vložení izolační vrstvy pro referenční vlákno.

Pro vyplnění prostou a uložení děličů a referenční větve byly použity nejdříve polystyrenové desky, ale tyto se ukázaly jako nepraktické. Proto byly nahrazeny akustickým molitanem, se kterým se mnohem lépe pracovalo a vykazoval lepší výsledky.





Obrázek 2.4: Uložení děličů a referenční větve na izolační vrstvě a vyvedení optických vláken otvory v šasi.

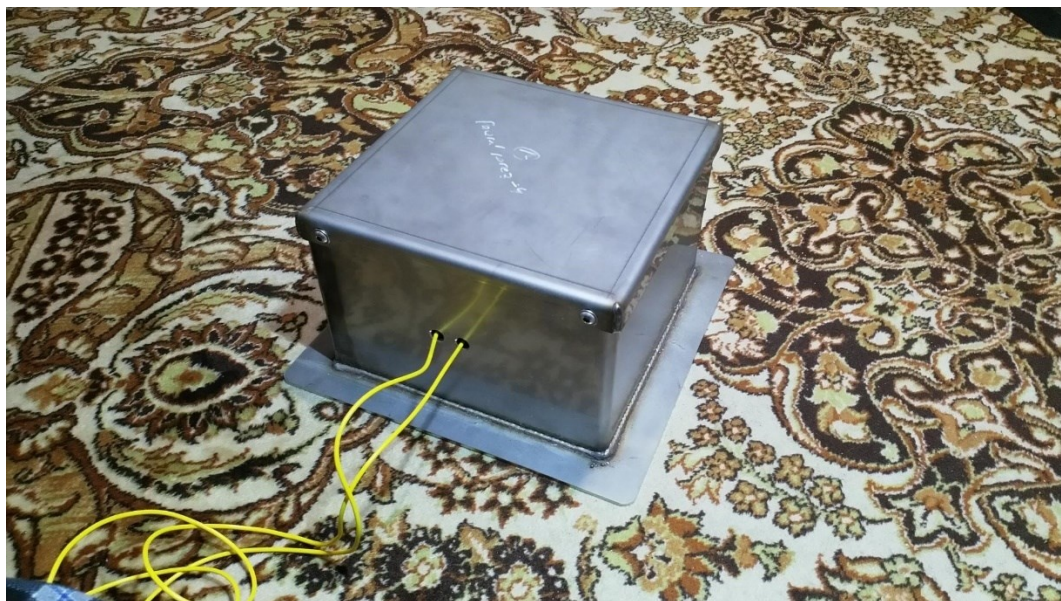
V prvním pokusu o sestrojení senzoru byl použit polystyren, ve kterém bylo nutné vypálit prostor pro vedení optických vláken sensorické větve a uložení děličů.



Obrázek 2.5: Po vložení druhé izolační vrstvy.

Použití akustického molitanu je praktičtější, jednodušší a lépe vyplní prostor v šasi, čímž spolehlivěji fixuje uložení optických vláken sensorické větve a děličů.





*Obrázek 2.6: Zcela složený interferometrický senzor bez dodatečných ochran.*

Víko šasi je upravené tak, aby překryv zajistil lepší odolnost proti vnějším vlivům. Je odolné proti poškození tlakem i nárazem, k celku je připevněno šrouby.



*Obrázek 2.7: Senzorická jednotka již s dodatečnými ochranami pro venkovní měření.*

Optická vlákna jsou chráněna proti poškození a pronikání vlhkosti chráničkou kabelů. Na výstupu ze šasi jsou přilepena jednosložkovým polymerovým lepidlem a zajištěna speciální vyztuženou lepicí páskou.





*Obrázek 2.8: Příprava výkopu pro měření.*

Součástí přípravy praktického měření je vykopání jámy hluboké cca 0,5-1 m, tato hodnota vychází z domluvy s bezpečnostními pracovníky DPO.



*Obrázek 2.9: Umístěný senzor v již připraveném výkopu.*

Senzor je uložený na dno vykopané jámy a vyvedená vlákna jsou zajištěná proti mechanickému poškození a také s ohledem na to, aby neohrozila bezpečnost projíždějících tramvají a případných chodců.





*Obrázek 2.10: Senzor po zahrnutí zeminou.*

Po zahrnutí senzoru proběhlo testování na šumové pozadí a zároveň funkční odezvu senzoru. Praktické měření probíhalo ve třech dnech za různých povětrnostních podmínek, po tuto dobu projížděly různé typy tramvajových souprav.



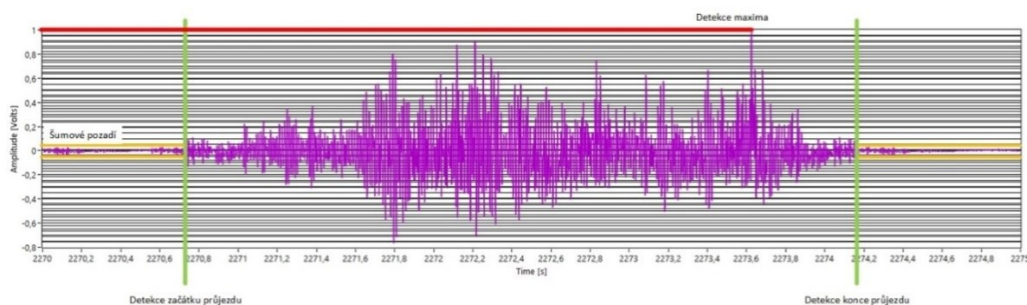
*Obrázek 2.11: Senzor s projíždějící tramvají.*

## 2.2 Zpracování signálu

Z výše uvedeného schématu vyplývá, že z interferometrického senzoru signál dále putuje do detektoru, kde se převede z optické domény na doménu elektrickou, tak aby mohl být dále zpracován elektrickými obvody. Potom signál dále prochází přes filtr sloužící k odfiltrování stejnosměrné složky (nežádoucích signálů jako je například vliv teploty, které se projevují do 2 Hz). Dále signál vstupuje

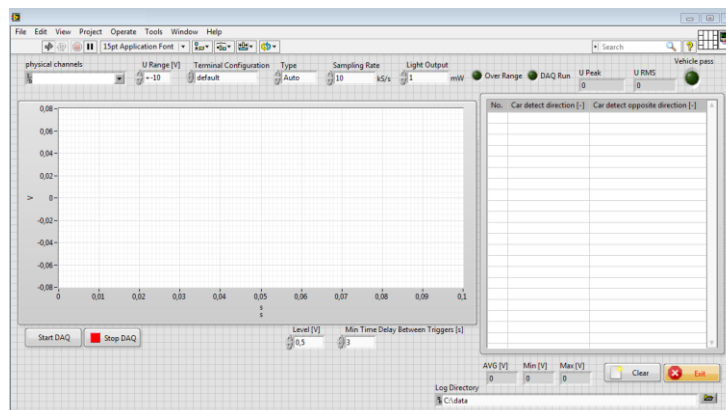
do měřicí karty od National Instruments NI USB 6210 zapojené v běžném počítači přes USB. Tato karta pracuje s vzorkovací frekvencí 10 kHz (po dohodě s vedoucím práce) a rozlišením 16 bitů. V počítači je naměřený signál zpracováván v programu vytvořeném v LabView (tento program byl vytvořen mimo tuto DP a byl dodán vedoucím práce). Program již automaticky po spuštění vyhodnocuje úroveň šumového pozadí a užitečný signál. Detekovány jsou maxima užitečného signálu a porovnávána s šumovým pozadím. Pokud je splněna podmínka, že detekované maximum má minimální odstup 3 dB (tato hodnota zajišťuje dostatečný odstup signálu od šumu) vůči šumovému pozadí, aplikace vyhodnocuje tento signál jako průjezd vozidla. Aby šum z okolí nepůsobil falešné detekce, použita je relativní úroveň namísto úrovně absolutní.

Na obrázku níže je ukázka analýzy detekce užitečného signálu a jeho srovnání s šumovým pozadím interferometrického senzoru, které je primárně tvořeno okolními vlivy (teplota, vítr apod.). Je velmi dobře patrné, že je splněna podmínka, kdy detekované maximum má minimálně 3 dB odstup od šumového pozadí. Ve skutečnosti je odstup mnohem výraznější a bylo tomu tak ve všech případech. Hodnota šumového pozadí se při všech měřeních pohybovala do hodnoty  $\pm 0,1$  V, naopak užitečný signál (průjezd tramvajového vozidla) od hodnot  $\pm 0,75$ -1,2 V. Lze tedy konstatovat, že konstrukce senzoru je zdařilá, ale samozřejmě bude nutné provést další navazující výzkum a dlouhodobá měření. Je také patrné, že detekce jednotlivých náprav tramvajových vozidel na první pohled není zřejmá a bylo by zde nutné dalšího SW zpracování signálu, které vzhledem k časové a technické náročnosti měření (nutný bezpečnostní dohled pracovníků DPO) a nepříznivým vnějším vlivům (vzniklá globální epidemie koronaviru) nebyla provedena.



Obrázek 2.12: Ukázka záznamu a vyhodnocení detekce průjezdu tramvajového vozidla.

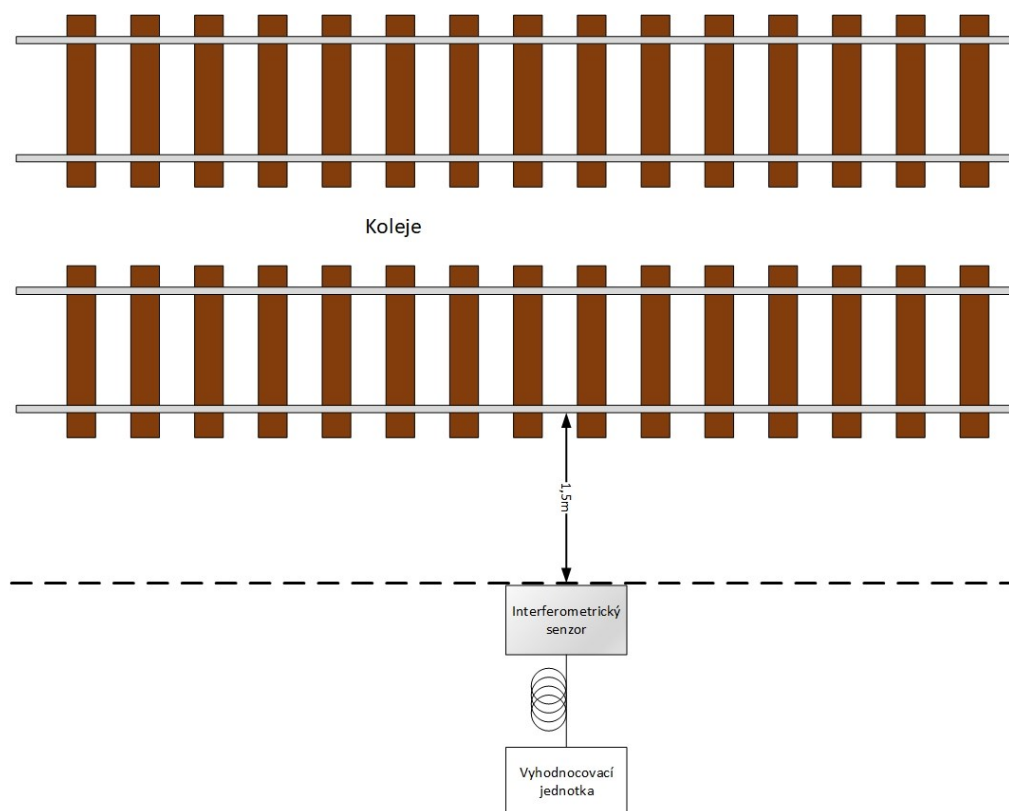
Níže je uvedena fotografie uživatelské části měřicí aplikace, která byla dodána vedoucím diplomové práce.



Obrázek 2.13: Část struktury aplikace.

### 2.2.1 Provedené praktické měření tramvají

Praktické měření probíhalo v Ostravě u Hranečnicku. Nejdříve po dohodě s bezpečnostními pracovníky dopravního podniku města Ostrava byl vykopán cca 50 cm hluboký výkop do kterého mohl být umístěn funkční vzorek interferometrického senzoru. Výkop byl po dohodě s dopravním podnikem Ostrava ve vzdálenosti jeden a půl metru od kolejí (viz obrázek níže). Bez souhlasu DP Ostrava by minimální vzdálenost činila tři metry. Výkop i se senzorem byla dále zahrnuta. Optické kabely jsme zajistili tak, aby nezpůsobily nehodu ani úraz. Vyhodnocovali jsme primárně blízkou kolej, uveden je i příkladný záznam z koleje vzdálené (zde je velmi dobře patrné, že vyšší vzdálenost tramvaje od senzoru způsobila menší odstup signálu od šumu). Průjezd tramvají (počet) byl zaznamenáván ručně jako reference.

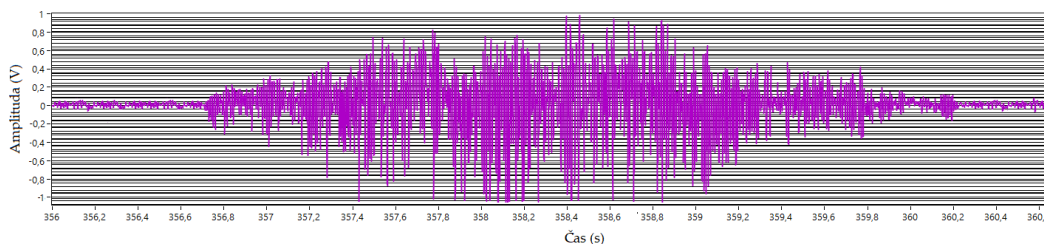


Obrázek 2.14: Zjednodušené schéma realizace praktických měření detekce tramvajových vozidel.

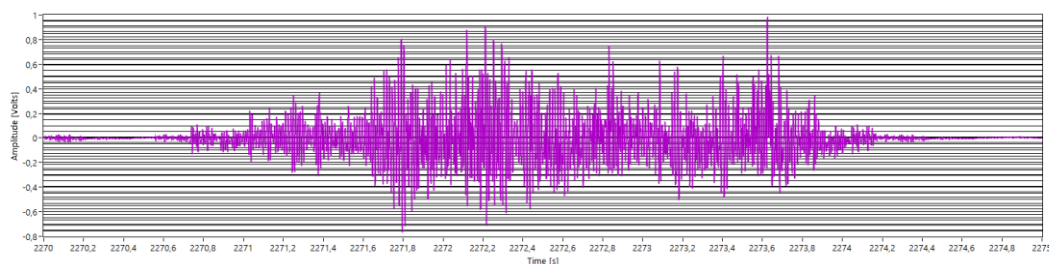
V rámci měřeného úseku jezdily tramvaje rychlostí maximálně 60 km/h dle limitace značení. Na tomto úseku se pohybovali tramvaje tohoto typu: Vario LFR, ČKD T3, Inekon LTM 10.08 a Inekon 2001 TRIO. Po dohodě s pracovníky DPO měření probíhalo 3 dny. První den bylo větrno s mírným deštěm a teplotou od šesti do deseti stupňů celsia. V tento den jsme zaznamenali dvacet dva průjezdů. Druhý den bylo slunečno a větrno. Teplota byla devět až dvanáct stupňů celsia. V tento den jsme zaznamenali třicet šest průjezdů. Třetí den bylo slunečno s teplotou jedenáct až patnáct stupňů celsia. V tento den jsme zaznamenali třicet čtyři průjezdů. Ve všech případech byla detekce stoprocentní.



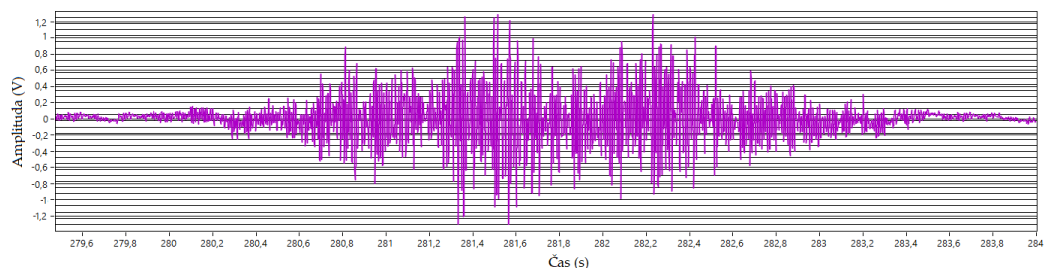
Níže jsou uvedeny příkladné záznamy z průjezdů různých typů tramvajových vozidel, které se pohybovali na daném měřicím úseku (zobrazeny jsou všechny 4 typy tramvajových vozidel). Je patrné, že v případě detekce na bližší koleji je v případě využití měřicí aplikace a principu vyhodnocení na základě minimálního odstupu 3 dB dosaženo 100% detekce tramvajových vozidel. Jak je uvedeno výše, v případě vzdálenější koleje je patrné, že rozkmit užitečného signálu klesl cca na polovinu, přesto i tak byla zaznamenána 100% detekce vozidel (takto byly sledovány pouze 4 vozidla, práce je zaměřena primárně na bližší kolej, v případě detekce na vzdálenější koleji lze využít například dalšího senzoru).



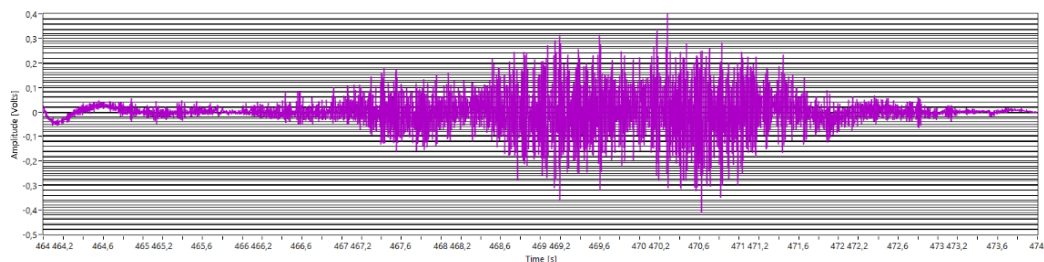
Obrázek 2.15: Příklad průjezdu tramvaje (typ Inekon LTM 10.08).



Obrázek 2.16: Příklad průjezdu tramvaje (typ Inekon 2001 TRIO).



Obrázek 2.17: Příklad průjezdu tramvaje (typ ČKD T3).



Obrázek 2.18: Příklad průjezdu tramvaje na vzdálené koleji (typ Vario LFR).

Pro detekci tramvajové dopravy byla využita pouze jedna senzorická jednotka. Úspěšná detekce (100 %) je také dána primárně velmi velkou odezvou, která je generována průjezdem několika tunové soupravy. Odolná konstrukce senzoru dala možnost měřit odezvu tramvají se zabudováním do země, jedná se dle provedené rešerše o originální přístup nejen v ČR, ale i ve světě.

Níže je uvedeno souhrnné zpracování naměřených výsledků formou tabulky, která popisuje dané měřicí dny, počet úspěšně detekovaných tramvají a také počet neúspěšně detekovaných tramvají. Jak bylo uvedeno výše, původní záměr diskutovaný s vedoucím DP provést a analyzovat větší vzorek dat byl kompromitován vzniklou globální epidemií koronaviru skrze časovou a technickou náročnost měření a nutný bezpečnostní dohled pracovníků DPO (velmi složité se domluvit za této situace). Přesto bylo realizováno měření zahrnující vzorek 92 průjezdů tramvajových souprav, které lze považovat za reprezentativní a vysoká míra úspěšnosti detekce také naznačuje slušný základ pro budoucí navazující výzkum.

Měřicí den	Počet úspěšně detekovaných tramvají (-)	Počet neúspěšně detekovaných tramvají (-)
1	22	0
2	36	0
3	34	0
celkem	92	0

Tabulka 1.1: *Tabulka úspěšně a neúspěšně detekovaných tramvají*

### 3 Závěr

V první části diplomové práce je zpracována teorie potřebná pro pochopení vlastností světla, optických vláken a šíření světla v optických vláknech. Porovnány a popsány jsou rozdíly mezi různými typy optických vláken s jejich výhodami a nevýhodami. Dále jsou popsány základní typy dnes majoritně používaných interferometrů a jejich aplikace v kolejové dopravě. Zpracována je rešerše popisující stav techniky nejen v ČR, ale také ve světě.

V následující praktické části je věnován prostor sestrojení senzoru vhodného pro implementaci do zeminy podél kolejové struktury, dále jeho testování a po ověření základní funkčnosti. Navazuje část popisující praktická měření tramvajových vozidel v reálném kolejovém provozu města Ostrava pod bezpečnostním dohledem pracovníků dopravního podniku Ostrava.

Výstupem této práce je funkční vzorek interferometrického senzoru typu Mach-Zehnder a výsledky praktických měření zahrnující vzorek 92 průjezdů tramvajových souprav různého typu, rychlosti a obsazenosti, které lze považovat vzhledem k vysoké míře detekce (100%) za reprezentativní. Tato práce představuje dobrý základ pro budoucí navazující výzkum, který je nutný dále provést primárně se zaměřením na větší vzorek a analýzu vnějších vlivů na celkovou funkci a citlivost senzoru.

## 4 Použitá Literatura:

- [1] Dušek, Martin a Mazanec, Michal. Ústav automatizace a měřicí techniky VUT v Brně [Online] 29. Června2012. [Citace: 14. říjen 2019.] [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1206.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf)
- [2] Centrum odborné přípravy technické Kroměříž. [Online] 2009 [Citace: 15. říjen 2019.] <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=5274>
- [3] Jandora, Radek. Neoficiální internetová fakulta všeho možného [Online] [Citace: 16. říjen 2019.] <http://radek.jandora.sweb.cz/fl9.htm>
- [4] David, Břeň. Aldebaran [Online] [Citace: 16. říjen 2019.] [http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz\\_13\\_maxw.pdf](http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_13_maxw.pdf)
- [5] Lukáš, Dalibor Katedra aplikované matematiky VŠB [Online] 2007 [Citace: 20. říjen 2019.] [http://homel.vsb.cz/~luk76/Teaching/MMEP/Fyzika\\_Maxwellovych\\_rovnic.pdf](http://homel.vsb.cz/~luk76/Teaching/MMEP/Fyzika_Maxwellovych_rovnic.pdf)
- [6] Plexo. pctuning. [Online] 22. leden 2008. [Citace: 21. říjen 2019.] [http://pctuning.tyden.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9994&catid=32&Itemid=72](http://pctuning.tyden.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=9994&catid=32&Itemid=72)
- [7] Bubník, Lukáš a Knajbl, Jiří a Mazuch, Petr Optoelektrotechnika [Online] 2015 [Citace: 24.říjen 2019.] <https://publi.cz/books/185/06.html>
- [8] Bubník, Lukáš a Knajbl, Jiří a Mazuch, Petr Optoelektrotechnika [Online] 2015 [Citace: 24.říjen 2019.] <https://publi.cz/books/185/05.html>
- [9] Mach, Pavel ČVUT Výroba Optických Vlákén [Online] [Citace: 24. říjen 2019.] <http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Opticka%20vlakna.pdf>
- [10] Reichl, Jaroslav a Všetická, Martin. Encyklopedie fyziky.[Online] [Citace: 1. listopad 2019.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/452-skladani-vlneni>
- [11] Reichl, Jaroslav a Všetická, Martin. Encyklopedie fyziky.[Online] [Citace: 1. listopad 2019.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/167-interference-vlneni>
- [12] Masarykova Universita [Online] 2010 [Citace: 2. listopad 2019.] [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2010/F3060/10\\_Koherence.txt](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2010/F3060/10_Koherence.txt)
- [13] Týma, Ondřej. Západočeská Univerzita v Plzni [Online] 2016 [Citace: 2. listopad 2019.] <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23128/1/BAKALARSKA%20PRACE%20-%20ONDREJ%20TYMA%20%28EL.%20VERZE%20SE%20ZADANIM%29.pdf>
- [14] Kamil. Fyzika III - Skalární Vlnová Optika [Online] 2010 [Citace: 2. listopad 2019.] [http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzikaIII\\_optika\\_2.pdf](http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzikaIII_optika_2.pdf)
- [15] Lukáš, Michal. Elektrověue Laserové diody [Online] 2002 [Citace: 3. listopad 2019.] <http://www.elektrověue.cz/clanky/02023/index.html>



- [16] Rýc, Jan. Vysoké Učení Technické [Online] 2011 [Citace: 3. Listopad 2019] [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38584#subsection.15](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38584#subsection.15)
- [17] Kuběna, Josef. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity Aplikovaná optika [Online] [Citace: 3. Listopad 2019] <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0ahUK EwjC5uvWx5vQA hUBzRQKHb46BBIQFgg4MAY&url=http%3A%2F%2Fwww.me d.muni.cz%2Focnipek%2Faplikoptl.ppt&usg=AFQjCNHmeoH1BaBkYCYZBnxAs7b3pa3HCvA&sig2=V62ja-L3IoOqkbqixgEMuw&cad=rja>
- [18] Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT [Online] [Citace: 5. listopad 2019.] [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_03.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf)
- [19] Woodford, Chris. Interferometers [Online] 2016 [Citace: 8. listopad 2019.] <http://www.explainthatstuff.com/howinterferometerswork.html>
- [20] Pavelek, Milan. Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [Online] 2007 [Citace: 9. listopad 2019.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1304.htm>
- [21] Šiška, Petr a kolektiv. Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB TUO Ostrava Nekomunikační Aplikace Optických vláken [Online] [Citace: 9. listopad 2019.] <http://ictpropraxi.vsb.cz/materials/Nekomunika%C4%8Dn%C3%AD%20aplikace%20optick%C3%BDch%20vl%C3%A1ken/Nekomunika%C4%8Dn%C3%AD%20aplikace%20optick%C3%BDch%20vl%C3%A1ken.pdf>
- [22] Mendelova Univerzita v Brně [Online] [Citace: 12. listopad 2019.] [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=52958](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=52958)
- [23] Ing. Jan Nedoma. Nedestruktivní optovláknový senzorový systém pro měření rychlosti v dopravním provozu 2017 [Online] [Citace: 12. únor 2020.] [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/127358/NED086\\_FEI\\_P1807\\_2601V01\\_8\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/127358/NED086_FEI_P1807_2601V01_8_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [24] Tomáš Matoušek. Návrh vláknově optického senzoru na bázi Mach-Zehnderova interferometru pro měření vybraných parametrů v dopravním provozu [Online] [Citace: 12. únor 2020.] [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/118905/MAT0297\\_FEI\\_B2647\\_2601R013\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/118905/MAT0297_FEI_B2647_2601R013_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [25] Ing. Martin Pápeš, Ing. Jakub Jaroš. Skripta Optické komunikace II [Online] [Citace: 12. únor 2020.]
- [26] MELLER, Scott A., Marten J. DE VRIES, Vivek ARYA, Richard O. CLAUS, Noel ZABARONICK, Pushkin KACHROO, Kaan OZBAY a Alan C. CHACHICH. Advances in optical fiber sensors for vehicle detection. In: Proceedings of SPIE 3207, 1998. s. 318-322. DOI: 10.1117/12.300853.

- [27] KOUROUSSIS, Georges, Christophe CAUCHETEUR, Damien KINET, Georgios ALEXANDROU, Olivier VERLINDEN a Véronique MOEYAERT. Review of Trackside Monitoring Solutions: From Strain Gages to Optical Fibre Sensors. *Sensors*. 2015, 15(8), s. 20115-20139. DOI: 10.3390/s150820115. ISSN 1424-8220.
- [28] Final Report Summary - ACEM RAIL (Automated and cost effective maintenance for railway). CORDIS[online]. 2014 Dostupné z: [http://cordis.europa.eu/result/rcn/141730\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/141730_en.html).
- [29] Optical sensor technology – revolutionising train monitoring. *Railway Technology* [online]. 2017 Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/features/featureoptical-sensor-technology-revolutionising-train-monitoring-4192849/>.
- [30] TANG, Qing, Laksono KURNIANGGORO a Kang-Hyun JO. Statistical and geometrical features for LiDAR-based vehicle detection. In: 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, 2016, s. 192-197. DOI: 10.1109/SII.2016.7843997. ISBN 978-1-5090-3329-4. 2017-10-19]. Dostupné z: [http://uic.org/cdrom/2003/ertms\\_conference\\_2003/docs/etcs\\_report\\_1.pdf](http://uic.org/cdrom/2003/ertms_conference_2003/docs/etcs_report_1.pdf).
- [31] AI, Hong a Yuning ZHENG. Characterization of a Traffic Management System Using Pyroelectric Infrared Sensors. *Instrumentation Science and Technology*. 43 (3), 2015. s. 319-333. DOI: 10.1080/10739149.2014.1002040.
- [32] RIVAS-LOPEZ, Moises, Carlos A. GOMEZ-SANCHEZ, Javier RIVERA-CASTILLO, Oleg SERGIYENKO, Wendy FLORES-FUENTES, Julio C. RODRIGUEZ-QUINONEZ a Pedro MAYORGA-ORTIZ. Vehicle detection using an infrared light emitter and a photodiode as visualization system. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2015. s. 972-975. DOI: 10.1109/ISIE.2015.7281603.
- [33] IMAZU, K. a Y. MITA. Range-measurement-type optical vehicle detector. In: Pacific Rim TransTech Conference. 1995 Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings. 6th International VNIS. A Ride into the Future. IEEE, 1995, 2308, s. 48-53. DOI: 10.1109/VNIS.1995.518817. ISBN 0-7803-2587-7.
- [34] BOWNESS, D., A. C. LOCK, W. POWRIE, J. A. PRIEST a D. J. RICHARDS. Monitoring the dynamic displacements of railway track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2016, 221(1), s. 13-22. DOI: 10.1243/0954409JRRT51. ISSN 0954-4097.
- [35] ROVERI, N., A. CARCATERRA a A. SESTIERI. Infrared Thermography Sensor for Temperature and Speed Measurement of Moving Material. *Sensors*. 2017, 17(5), 1157. DOI: 10.3390/s17051157. ISSN 1424-8220.
- [36] HILL, David. Distributed Acoustic Sensing (DAS): Theory and Applications. In: *Frontiers in Optics 2015*. Washington, D.C: OSA, 2015, 2308. DOI: 10.1364/FIO.2015.FTh4E.1. ISBN 978-1-943580-03-3.

- [37] DUCKWORTH, Gregory. Distributed Sensing Applications of Rayleigh Scattering in Fiber Optic Cables. In: Imaging and Applied Optics. Washington, D.C: OSA, 2013, 2308. DOI: 10.1364/AIO.2013.AM3B.3. ISBN 978-1-55752-975-6.
- [38] HLAVAC, M. Distributed fiber optic sensing for traffic monitoring purposes. In: Proceedings of SPIE 6619, 2007. DOI: 10.1117/12.738666.
- [39] Measurement of the train profile. Sensor Intelligence [online]. Sensor Intelligence, 2017 Dostupné z: <https://www.sick.com/de/en/industries/traffic/rail/solutions-for-traffic-safety-at-railways/measurement-of-the-train-profile/c/p329737>.
- [40] JWA, Y. a G. SONH. Kalman Filter Based Railway Tracking from Mobile Lidar Data. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015, II-3/W5, s. 159-164. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-159-2015. ISSN 2194-9050.
- [41] LESLAR, Michael, Perry GORDON a Keith MCNEASE. Using mobile lidar to survey a railway line for asset inventory. In: ASPRS 2010 Annual Conference. San Diego, 2010.
- [42] ANDANI, Masood, Taheri a A. MOHAMMED a A. JAIN. Application of LIDAR technology for rail surface monitoring and quality indexing. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717727200>.
- [43] KLUG, Ferdinand, S. LACKNER a W. LIENTHART. Monitoring of Railway Deformations using Distributed Fiber Optic Sensors. In: Joint International Symposium on Deformation Monitoring. Vienna, 2016.
- [44] LÓPEZ-HIGUERA, José M., Julian D. C. JONES, Manuel LÓPEZ-AMO, et al. Distributed optical fiber sensors for integrated monitoring of railway infrastructures. In: Proc. of SPIE 9157. 2014, s. 91575W-. DOI: 10.1117/12.2059082.
- [45] YOON, Hyuk-Jin, Kwang-Yong SONG, Chanyong CHOI, Hee-Seoung NA a Jung-Seok KIM. Real-Time Distributed Strain Monitoring of a Railway Bridge during Train Passage by Using a Distributed Optical Fiber Sensor Based on Brillouin Optical Correlation Domain Analysis. Journal of Sensors. 2016, 2016, s. 1-10. DOI: 10.1155/2016/9137531. ISSN 1687-725x.
- [46] Distributed Train Control System. Amit-Transportation [online]. Amit, 2017 Dostupné z: <https://www.amit-transportation.com/en/product/distributed-control-system/>.
- [47] PENG, Fei, Ning DUAN, Yun-Jiang RAO a Jin LI. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR. IEEE Photonics Technology Letters. 2014, 26(20), s. 2055-2057. DOI: 10.1109/LPT.2014.2346760. ISSN 1041-1135.
- [48] YOON, Hyuk-Jin, Kwang-Yong SONG, Jung-Seok KIM a Dae-Sang KIM. Longitudinal strain monitoring of rail using a distributed fiber sensor based on

- Brillouin optical correlation domain analysis. NDT. 2011, 44(7), s. 637-644. DOI: 10.1016/j.ndteint.2011.07.004. ISSN 09638695.
- [49] MINARDO, Aldo, Giuseppe PORCARO, Daniele GIANNETTA, Romeo BERNINI a Luigi ZENI. Real-time monitoring of railway traffic using slope-assisted Brillouin distributed sensors. *Applied Optics*. 2013, 52(16), s. 3770-3776. DOI: 10.1364/AO.52.003770. ISSN 0003-6935.
- [50] ZENI, Luigi, Aldo MINARDO, Giuseppe PORCARO, Daniele GIANNETTA a Romeo BERNINI. Monitoring railways with optical fibers. *SPIE Newsroom*. 2013. DOI: 10.1117/2.1201311.005246. ISSN 18182259.
- [51] TIMOFEEV, Andrey V. a Dmitry V. EGOROV. The Rail Traffic Management with Usage of C-OTDR Monitoring Systems. In: *ICCAR 2015 : 17th International Conference on Control, Automation and Robotics*. Zurich, 2015.
- [52] PAPP, Adam, Christoph WIESMEYR, Martin LITZENBERGER, Heinrich GARN a Walter KROPATSCH. Train Detection and Tracking in Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) Signals. In: *Pattern Recognition*. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 320-331. DOI: 10.1007/978-3-319-45886-1\_26. ISBN 978-3-319-45885-4.
- [53] LÓPEZ-HIGUERA, José M., Julian D. C. JONES, Manuel LÓPEZ-AMO, et al. Field test for real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive optical time domain reflectometry ( $\Phi$ -OTDR). In: *OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*. 2014, s. 91577A-. DOI: 10.1117/12.2059188.
- [54] SOKOLOWSKI, Kamil, Andrzej W. DOMANSKI, Tomasz R. WOLINSKI a Ryszard S. ROMANIUK. Intensity-based fiber optic bend sensor for potential railway application. In: *Proc. of SPIE 5484*. 2004, s. 417-420. DOI: 10.1117/12.568927.
- [55] CHOI, Sang-Jin, Young-Chon KIM, Minho SONG a Jae-Kyung PAN. A Self-Referencing Intensity-Based Fiber Optic Sensor with Multipoint Sensing Characteristics. *Sensors*. 2014, 14(7), s. 12803-12815. DOI: 10.3390/s140712803. ISSN 1424-8220.
- [56] LAU, Siu. System and process for monitoring railway tracks. EP1582430 A1 Patent. Zapsáno 5.10.2005.
- [57] KRAMER, Dennis A. Pressure sensor utilizing microbending of a fiber optic cable woven through a ladder shaped structure. US5193129 A Patent. Zapsáno 27.3.1993.
- [58] RAILWAY MONITORING APPLICATIONS. Polytec [online]. Polytec, 2017 Dostupné z: [http://www.polytec.com/fileadmin/user\\_uploads/Products/Faseroptische\\_Sensorik/documents/PH\\_TFT\\_APPNOTE\\_-\\_Railway.pdf](http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Faseroptische_Sensorik/documents/PH_TFT_APPNOTE_-_Railway.pdf).
- [59] ROVERI, N., A. CARCATERRA a A. SESTIERI. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors. *Mechanical Systems and*

- Signal Processing. 2015, 60-61, s. 14-28. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.01.003. ISSN 08883270.
- [60] ROVERI, Nicola, Antonio CARCATERRA a Aldo SESTIERI. Real time monitoring and wear estimation of railway track with FBG sensors. In: 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). IEEE, 2014, s. 1-6. DOI: 10.1109/MESA.2014.6935619.
- [61] ROVERI, Nicola, Antonio CARCATERRA a Aldo SESTIERI. Remote condition monitoring of railway track using FBG sensors. In: Proceedings of ISMA 2014 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2014 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics. KU Leuven, 2014, s. 3527-3542. ISBN 9789073802919.
- [62] FILOGRANO, M. L., P. CORREDERA GUILLEN, A. RODRIGUEZ-BARRIOS, S. MARTIN-LOPEZ, M. RODRIGUEZ-PLAZA, Álvaro ANDRES-ALGUACIL a M. GONZALEZ-HERRAEZ. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors. IEEE Sensors Journal. 2012, 12(1), s. 85-92. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2135848. ISSN 1530-437X.
- [63] WEI, Chuliang, LAI, Chuncheung, LIU, Shunye, et al. Rail Expansion Devices Monitored by FBG sensors on an Urban Railway Viaduct. Photonic Sensors. 2014, vol. 4(2) s. 173–179. ISSN 1674-9251. DOI: 10.1007/s13320-014-0163-6.
- [64] WEI, Chuliang, LAI, Chuncheung, LIU, Shunye, et al. A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting. IEEE Sensors Journal. 2010, vol. 10(12) s. 1905–1912. ISSN 1530437X. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2049199.
- [65] ROVERI, Nicola, CARCATERRA, Antonio, SESTIERI, Aldo. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors. Mechanical Systems and Signal Processing. 2015, 60, s. 14–28. ISSN 08883270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.01.003.
- [66] WOSCHITZ, Helmut. Development of a rail-strain-pad using FBG sensors. In: 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Cancun, Quintana Roo, 2011, s. 1–10.
- [67] HWA YAW TAM, SIU LAU HO, MICHAEL SHUN YEE LIU. Railway Monitoring System. Patent, US20080019701 A1. Uděleno: 24.1.2008.
- [68] UDD, Eric. Fiber optic sensors for infrastructure applications. Oregon State Library [online]. 1998 Dostupné z: [http://www.oregon.gov/ODOT/TD/TP\\_RES/ResearchReports/FiberOpticSensors.pdf](http://www.oregon.gov/ODOT/TD/TP_RES/ResearchReports/FiberOpticSensors.pdf).
- [69] CRAIL, Stephanie, REICHEL, D., et al. Strain monitoring of a newly developed precast concrete track for high speed railway traffic using embedded fiber-optic sensors. In: Proc. of SPIE 4694, 2002, 4694, s. 259–264. ISSN 0277786X. DOI: 10.1117/12.472627.
- [70] SIEMENS AG. Rail contacting device in railway systems, particularly for axle counting devices. Patent, DE3537588 A1. Uděleno: 23.4.1987.

- [71] BLEDIN; ANTHONY G. Contact fiber optic impact sensor. Patent, US6144790 A. Uděleno: 7.11.2000.
- [72] Jan Nedoma, Martin Stolarik, Marcel Fajkus, Miroslav Pinka and Stanislav Hejduk. Use of Fiber-Optic Sensors for the Detection of the Rail Vehicles and Monitoring of the Rock Mass Dynamic Response Due to Railway Rolling Stock for the Civil Engineering Needs Published: 2 January 2019

## **5 Seznam příloh**